

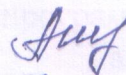
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра морського приладобудування

ДОПУЩЕНИЙ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри



Гайдай Г.Ю.

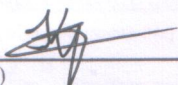
«17» 06 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

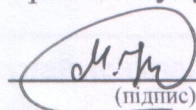
на тему: **«Апаратно-програмний комплекс керування світлодіодною матрицею на базі 32-бітного мікроконтролера»**

Виконав: студент групи 4651

 **Крук В.О.**  
(підпис)

Керівник роботи:

викладач кафедри морського  
приладобудування, PhD

 **Козлов М.О.**  
(підпис)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
імені адмірала Макарова

Інститут  
Кафедра  
Спеціальність

ННІАЕ  
морського приладобудування  
123 Комп'ютерна інженерія  
Комп'ютерні системи та мережі

Освітня програма

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми

Гайдай Г.Ю.

« 17 » 06 2026 рік

**З А В Д А Н Н Я**  
**НАКВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студенту Круку Володимиру Олександровичу  
(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Апаратно-програмний комплекс керування світлодіодною матрицею на базі 32-бітного мікроконтролера»

Керівник роботи Козлов Максим Олегович, доктор філософії (PhD)  
(Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 286 ур від « 22 » 04 2026 року

2. Термін подання роботи: 15.06.26

3. Вихідні дані по роботі: 32-розрядний мікроконтролер  
ESP32

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

1. Аналіз стану питання та обґрунтування вибору апаратних компонентів;

2. Апаратна реалізація комплексу керування світлодіодною матрицею;

3. Програмне забезпечення та тестування роботи комплексу;

4. Охорона праці;

5. Перелік презентаційних матеріалів: Презентація по пояснюваль-  
ний запис

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| 06 01  | Тубальцев А.М.                            |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання « 9 » 02 2026 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                                                | Терміни виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1.    | Аналіз стану питання та обґрунтування вибору апаратних компонентів | 9.02 – 22.02                    | вик.     |
| 2.    | Апаратна реалізація комплексу керування світлодіодною матрицею     | 22.02 – 11.03                   | вик.     |
| 3.    | Програмне забезпечення та тестування роботи комплексу              | 11.03 – 25.04                   | вик.     |
| 4.    | Охорона праці                                                      | 25.04 – 18.05                   | вик.     |
|       |                                                                    |                                 |          |
|       |                                                                    |                                 |          |
|       |                                                                    |                                 |          |
|       |                                                                    |                                 |          |

Студент

Керівник роботи

(підпис)

Крук В.О.

(прізвище та ініціали)

Козлов М.О.

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

**Крук В.О.** «Апаратно-програмний комплекс керування світлодіодною матрицею на базі 32-бітного мікроконтролера». Кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньої програми «Комп'ютерні системи та мережі». Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. 2026 рік. 84 сторінки.

У кваліфікаційній роботі розроблено апаратно-програмний комплекс для ефективного керування світлодіодною матрицею та виведення динамічної інформації на базі 32-бітного мікроконтролера ESP32. Проведено аналіз існуючих засобів формування зображення та архітектур мікроконтролерів, обґрунтовано вибір 32-бітної платформи з підтримкою апаратного контролера прямого доступу до пам'яті для забезпечення високої частоти оновлення кадрів без мерехтіння. Розроблено структурну та принципову електричну схеми пристрою, що включають підсистему безпечного імпульсного живлення, вузли узгодження рівнів, гальванічну розв'язку та додаткову периферію, таку як сенсорне керування та зчитувач карток microSD. Реалізовано алгоритми програмного рендерингу графічних примітивів, подвійної буферизації та динамічних ефектів, зокрема «рухомого рядка» та погодних анімацій. Використано клієнтське програмне забезпечення у вигляді кросплатформного веб-додатку, що розгортається безпосередньо на мікроконтролері і дозволяє здійснювати дистанційне керування матрицею по бездротовій мережі Wi-Fi, гнучко налаштовувати параметри відображення, текстові повідомлення та інтерактивні ігрові режими. Отримані результати можуть бути застосовані для створення надійних та масштабованих інформаційних табло у сферах комерційної реклами, промислової візуалізації телеметрії в реальному часі та сучасних систем розумного міста.

**Ключові слова:** Світлодіодна матриця; мікроконтролер ESP32; інтерфейс HUB75; бездротове керування Wi-Fi; контролер DMA; динамічна індикація; веб-інтерфейс; інформаційне табло.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 4    |

## ABSTRACT

**Kruk V.O.** «Hardware-Software Complex for LED Matrix Control Based on a 32-Bit Microcontroller». Qualification work in specialty 123 «Computer Engineering», educational program «Computer Systems and Networks». – Mykolaiv: Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 2026, 84 pages.

In the qualification work, a hardware-software complex for effective control of the LED matrix and output of dynamic information based on the 32-bit ESP32 microcontroller was developed. An analysis of existing image formation tools and microcontroller architectures was conducted, and the choice of a 32-bit platform with support for a hardware controller for direct memory access to ensure a high frame refresh rate without flickering was justified. A structural and principle electrical diagram of the device was developed, including a subsystem of safe pulsed power supply, level matching nodes, galvanic isolation and additional peripherals, such as touch control and a microSD card reader. Algorithms for software rendering of graphic primitives, double buffering and dynamic effects, in particular the "moving line" and weather animations, have been implemented. Client software has been created in the form of a cross-platform web application, which is deployed directly on the microcontroller and allows remote control of the matrix via a Wi-Fi wireless network, flexible configuration of display parameters, text messages and interactive game modes. The results obtained can be applied to create reliable and scalable information boards in the areas of commercial advertising, industrial visualization of real-time telemetry, and modern smart city systems.

**Keywords:** LED matrix; ESP32 microcontroller; HUB75 interface; Wi-Fi wireless control; DMA controller; dynamic indication; web interface; information board.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 5    |

## ЗМІСТ

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....                                                                                          | 8  |
| ВСТУП .....                                                                                                              | 9  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ .....                                       | 11 |
| 1.1 Постановка завдання та актуальність розробки сучасних систем візуалізації .....                                      | 12 |
| 1.2 Огляд та аналіз існуючих аналогів світлодіодних матричних екранів та інформаційних табло .....                       | 12 |
| 1.3 Аналіз архітектур мікроконтролерів для керування засобами відображення .....                                         | 14 |
| 1.3.1 8-бітні архітектури.....                                                                                           | 15 |
| 1.3.2 32-бітні архітектури.....                                                                                          | 16 |
| 1.4 Порівняльна характеристика мікроконтролерів та обґрунтування вибору платформи ESP32.....                             | 17 |
| Висновки за розділом 1 .....                                                                                             | 20 |
| РОЗДІЛ 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ СВІТЛОДІОДНОЮ МАТРИЦЕЮ.....                                            | 22 |
| 2.1 Аналіз засобів формування зображення: готові світлодіодні матриці та адресні стрічки .....                           | 23 |
| 2.2 Методика побудови матриць довільної роздільної здатності, принципи каскадування та особливості їх підключення .....  | 25 |
| 2.3 Апаратна архітектура мікроконтролера ESP32: технічні характеристики, призначення виводів та інтерфейси зв'язку ..... | 30 |
| 2.4 Розробка принципової електричної схеми пристрою .....                                                                | 33 |
| 2.4.1 Вибір та розрахунок електронної обв'язки.....                                                                      | 35 |
| 2.4.2 Інтеграція додаткових модулів, кнопок керування та підсистеми живлення.....                                        | 36 |
| Висновки за розділом 2 .....                                                                                             | 38 |
| РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ КОМПЛЕКСУ .....                                                    | 41 |

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 6    |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Розробка алгоритму роботи базового програмного забезпечення мікроконтролера ESP32.....                      | 43 |
| 3.2 Конфігурація параметрів матриці та ініціалізація апаратних інтерфейсів....                                  | 45 |
| 3.3 Реалізація мережевої взаємодії мікроконтролера з керуючим додатком .....                                    | 49 |
| 3.4 Розробка алгоритмів обробки даних та формування динамічних ефектів ....                                     | 52 |
| 3.5 Опис роботи клієнтського додатку для керування пристроєм та передачі інформації .....                       | 54 |
| 3.6 Демонстрація готового виробу та результати тестування апаратно-програмного комплексу в різних режимах ..... | 64 |
| Висновки за розділом 3 .....                                                                                    | 69 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                                   | 71 |
| 4.1 Аналіз умов праці та потенційних небезпек при розробці та експлуатації мікроелектронних систем .....        | 72 |
| 4.2 Виробниче освітлення .....                                                                                  | 75 |
| 4.3 Електробезпека.....                                                                                         | 77 |
| Висновки за розділом 4 .....                                                                                    | 78 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                                  | 80 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                 | 82 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЗВ – пристрій захисного відключення;  
ШИМ – широтно-імпульсна модуляція;  
BLE – Bluetooth Low Energy;  
DMA – Direct Memory Access;  
GPIO – General-Purpose Input/Output;  
HTTP – HyperText Transfer Protocol;  
I2C – Inter-Integrated Circuit;  
I2S – Inter-IC Sound;  
IDE – Integrated Development Environment;  
IoT – Internet of Things;  
LDO – Low-Dropout Regulator;  
LED – Light-Emitting Diode;  
MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor;  
NTP – Network Time Protocol;  
OTA – Over-The-Air;  
RGB – Red, Green, Blue;  
RTC – Real-Time Clock;  
SMD – Surface-Mounted Device;  
SPI – Serial Peripheral Interface;  
SRAM – Static Random Access Memory;  
UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 8    |

## ВСТУП

**Актуальність теми:** створення сучасних, гнучких та керованих по бездротовій мережі засобів візуалізації даних є критично важливим завданням, оскільки це дозволяє миттєво оновлювати інформаційний контент без необхідності фізичного доступу до обладнання та прокладання додаткових комунікацій. Бездротові технології забезпечують оновлення показників у режимі реального часу для миттєвого прийняття рішень, водночас суттєво знижуючи витрати на інфраструктуру та дозволяючи вільно розміщувати екрани навіть у важкодоступних місцях. Такі системи гарантують зручний централізований контроль, швидке масштабування та повну адаптивність до різних пристроїв і конкретних потреб користувача.

**Мета роботи:** Розробка апаратно-програмного комплексу керування світлодіодною матрицею на базі 32-бітного мікроконтролера для виведення динамічної інформації.

**Об'єкт дослідження:** Процес апаратного керування та програмної генерації динамічних візуальних даних на світлодіодних матрицях.

**Предмет дослідження:** Апаратні засоби та програмні методи передачі і відображення інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести комплексний аналіз предметної області та існуючих апаратно-програмних рішень для відображення динамічного графічного контенту.
2. Обґрунтувати вибір елементної бази та розробити апаратну архітектуру пристрою на базі мікроконтролера ESP32.
3. Розробити схемотехнічні рішення для інтеграції мікроконтролера з адресною світлодіодною матрицею стандарту HUB75, включаючи вузли узгодження рівнів сигналів та стабілізації живлення.
4. Спроекувати та реалізувати базові алгоритми керування матрицею для формування динамічного графічного контенту.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                      | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

5. Створити мікропрограмне забезпечення, що реалізує асинхронне виконання задач, апаратну роботу з DMA, обробку графіки та роботу внутрішнього HTTP-сервера.
6. Розробити клієнтське програмне забезпечення для дистанційного керування конфігурацією портів, режимами відображення та ігровими механіками в режимі реального часу.
7. Виготовити фізичний прототип комплексу, оптимізувати його собівартість та провести експериментальне тестування стабільності його роботи в різних режимах.
8. Виконати аналіз умов праці, визначити потенційні шкідливі виробничі фактори та розробити відповідні заходи з охорони праці під час створення й експлуатації пристрою. Об'єкт дослідження: Процес керування світлодіодними системами візуалізації даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні універсального, бюджетного пристрою для виводу інформації.

Запропонований пристрій може використовуватися в таких галузях:

- Реклама та комерція: динамічні вивіски, рухомі інформаційні рядки та плавне відтворення піксельної анімації на вітринах..
- Промисловість та лабораторії: відображення показників із датчиків у реальному часі, візуалізація стану динамічних систем та миттєве виведення аварійних попереджень.
- Спеціалізований транспорт: Виведення критично важливих даних навігаційних приладів (наприклад, показників крену чи курсу) для швидкого контролю за будь-яких умов.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      | 10   |

|             |      |              |        |      |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |
|-------------|------|--------------|--------|------|-----------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--------------------|--|------|---------|
|             |      |              |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1                                                     |  |  |  |                    |  |      |         |
|             |      |              |        |      |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |
| Змн.        | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |
| Розробив    |      | Крук В.О.    |        |      | АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ<br>ТА ОБҐРУНТУВАННЯ<br>ВИБОРУ АПАРАТНИХ<br>КОМПОНЕНТІВ |  |  |  | Літ.               |  | Арк. | Аркушів |
| Керівник    |      | Козлов М.О.  |        |      |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |
| Консульт.   |      |              |        |      |                                                                             |  |  |  | НУКім.ам. Макарова |  |      |         |
| Н. контроль |      | Грешнов А.Ю. |        |      |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |
| Зав. каф.   |      |              |        |      |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |
|             |      |              |        |      |                                                                             |  |  |  |                    |  |      |         |

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ

## 1.1 Постановка завдання та актуальність розробки сучасних систем візуалізації

У сучасних умовах стрімкого розвитку інтернету речей, систем розумного міста та автоматизації промисловості зростає потреба у надійних, гнучких та високопродуктивних засобах візуалізації інформації[11, 12]. Світлодіодні (LED) матриці є одним із найефективніших інструментів для відображення даних завдяки їхній високій яскравості, довговічності та масштабованості.

Традиційні системи керування на базі 8-бітних мікроконтролерів вже не здатні повною мірою задовольнити сучасні вимоги до візуалізації. Вони мають обмеження в обчислювальній потужності та обсязі пам'яті, що унеможливлює швидку обробку великих масивів даних у режимі реального часу. Перехід на 32-бітні мікроконтролери вирішує цю проблему. Вони забезпечують достатню продуктивність для апаратного відтворення складної графіки, використання технології прямого доступу до пам'яті (DMA) та одночасної паралельної обробки сигналів із зовнішніх датчиків.

Розробка такого апаратно-програмного комплексу є актуальною, оскільки вона дозволяє створити універсальну платформу, здатну миттєво обробляти та візуалізувати як інформаційно-рекламний контент, так і критично важливі метрики динамічних систем, забезпечуючи при цьому високу швидкодію та стабільність роботи[21].

## 1.2 Огляд та аналіз існуючих аналогів світлодіодних матричних екранів та інформаційних табло

Для обґрунтування апаратно-програмних рішень, що застосовуються у розроблюваному комплексі, необхідно провести аналіз існуючих систем керування світлодіодними матрицями. Сучасні аналоги на ринку та у сфері

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 12   |

відкритих розробок можна розділити на кілька основних груп залежно від архітектури управління та сфери застосування.

Першу групу становлять комерційні контролери від таких виробників, як Huidu, Novastar або Linsn. Це готові промислові плати для керування великими медіа фасадами та комерційними екранами. Їхньою головною перевагою є висока стабільність роботи, підтримка відео високої роздільної здатності та наявність фірмового програмного забезпечення для віддаленого управління контентом. Проте їхня замкнена пропрієтарна архітектура унеможливорює зміну низькорівневих алгоритмів або додавання нестандартних функцій. Крім того, висока вартість та апаратна надмірність роблять такі рішення нерентабельними для локальних вбудованих завдань чи специфічних IoT-проектів.

Друга група включає рішення на базі одноплатних мікрокомп'ютерів, наприклад, RaspberryPi. Вони працюють під управлінням повноцінних операційних систем на базі ядра Linux, що забезпечує величезну обчислювальну потужність, підтримку високорівневих мов програмування та легку інтеграцію з мережевими сервісами. Головним недоліком такого підходу є відсутність жорсткого реального часу. Багатозадачність операційної системи вносить непередбачувані затримки при генерації сигналів для відображення, що призводить до помітного мерехтіння екрана. Також ці системи мають тривалий час завантаження і порівняно високе енергоспоживання.

Третю групу утворюють бюджетні системи на базі 8-бітних мікроконтролерів, таких як платформи сімейства Arduino. Вони є найпоширенішими в аматорському середовищі завдяки низькій вартості, простоті розробки та великій кількості готових бібліотек. Однак критичний брак оперативної пам'яті та низька тактова частота роблять їх абсолютно непридатними для роботи з багатоколірними матрицями. 8-бітні платформи не здатні зберігати великі графічні буфери та програмно генерувати ШІМ-сигнали для відображення відтінків без катастрофічного падіння частоти кадрів.

Четверта група – це спеціалізовані системи на базі 32-бітних мікроконтролерів (наприклад, архітектури ARM Cortex-M або ESP32), які є

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

найближчими аналогами до розроблюваного комплексу. Вони поєднують високу продуктивність із жорстким апаратним контролем часу виконання операцій. Їхньою ключовою перевагою є наявність контролера прямого доступу до пам'яті (DMA), який дозволяє передавати масиви даних з оперативної пам'яті безпосередньо на піни матриці без участі процесорного ядра. Це гарантує ідеальну плавність зображення та вивільняє ресурси процесора для паралельного виконання інших завдань, таких як обробка даних із зовнішніх датчиків. Хоча програмування таких систем вимагає глибокого розуміння апаратної архітектури, саме цей підхід забезпечує найкращі технічні результати.

Підсумовуючи результати аналізу, можна зробити висновок, що використання комерційних контролерів є недоцільним через їхню закритість, одно платні комп'ютери не гарантують стабільності відображення у реальному часі, а 8-бітні мікроконтролери не володіють достатніми ресурсами. Таким чином, застосування 32-бітного мікроконтролера є найбільш обґрунтованим рішенням для розробки. Ця архітектура пропонує оптимальний баланс між обчислювальною потужністю, точним контролем часу для управління LED-матрицями, гнучкістю програмної розробки та економічною ефективністю пристрою. Крім того, такий вибір відкриває широкі перспективи для подальшої модернізації та інтеграції розробленого комплексу в сучасні інформаційні екосистеми. Завдяки відкритій програмній архітектурі та наявності швидкісних комунікаційних інтерфейсів, створена платформа стає не просто засобом виведення графіки, а багатофункціональним інструментом.

### **1.3 Аналіз архітектур мікроконтролерів для керування засобами відображення**

Ефективність роботи апаратно-програмного комплексу для керування світлодіодною матрицею безпосередньо залежить від обраної архітектури мікроконтролера. Основними критеріями для систем візуалізації є швидкість обробки даних, обсяг оперативної пам'яті та наявність спеціалізованої апаратної периферії. Історичний та технічний перехід від 8-бітних до 32-бітних систем

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

наочно демонструє еволюцію можливостей таких пристроїв при роботі з графікою.

### 1.3.1 8-бітні архітектури

Базові 8-бітні мікроконтролери побудовані на основі ядра, здатного обробляти дані порціями по 8 біт за один машинний такт [10]. Вони зазвичай працюють на тактових частотах від 8 до 20 МГц. Головним обмеженням цих платформ під час роботи з багатоколірними LED-матрицями є критично малий обсяг оперативної пам'яті, який найчастіше не перевищує 2–8 КБ.

Для повноколірного відображення на стандартній матриці розміром 64×32 пікселі необхідний обсяг кадрового буфера визначається за формулою:

$$B_{buf} = W \times H \times N_{ch}, \quad (1.1)$$

де  $W$  – кількість пікселів по горизонталі;  $H$  – кількість пікселів по вертикалі;  $N_{ch}$  – кількість кольорових каналів (для RGB  $N_{ch} = 3$ ).

Підставивши значення для матриці 64×32 пікселі, отримаємо:

$$B_{buf} = 64 \times 32 \times 3 = 6144 \text{ байт} \approx 6 \text{ КБ}. \quad (1.2)$$

Таким чином, лише один графічний буфер потребує понад 6 КБ пам'яті. Реалізація алгоритмів подвійної буферизації, необхідної для усунення графічних артефактів під час зміни кадрів, вимагає подвоєння цього обсягу, що становить:

$$B_{total} = 2 \times B_{buf} = 2 \times 6144 = 12288 \text{ байт} \approx 12 \text{ КБ}. \quad (1.3)$$

Цей обсяг значно перевищує наявну оперативну пам'ять 8-бітних мікроконтролерів (2–8 КБ), що робить подвійну буферизацію фізично неможливою.

Крім того, 8-бітні системи мають обмежені можливості периферії. Виведення даних на матрицю здійснюється виключно процесорним ядром за допомогою програмного перемикування станів виводів. Це призводить до того, що процесор витрачає майже 100% свого часу на циклічне оновлення екрана, не залишаючи ресурсів для опитування зовнішніх датчиків чи отримання даних по

інтерфейсах зв'язку. Як наслідок, частота оновлення суттєво падає, екран починає мерехтіти, а кількість відображуваних відтінків зводиться до мінімуму.

### 1.3.2 32-бітні архітектури

Сучасні 32-бітні мікроконтролери здійснюють обробку 32-бітних слів за один машинний такт, що забезпечує багаторазовий приріст продуктивності порівняно з 8-бітними аналогами. Вони працюють на значно вищих тактових частотах (зазвичай від 72 МГц у базових моделях STM32 до 240 МГц у двоядерних рішеннях на кшталт ESP32). Це дозволяє виконувати складні математичні обчислення в реальному часі, що є критично важливим для генерації динамічних графічних ефектів та плавної анімації.

Однією з ключових переваг є значно більший обсяг оперативної пам'яті (SRAM), який у таких системах становить від десятків до сотень кілобайт (наприклад, 520 КБ у чіпах ESP32). Такий ресурс дозволяє вільно розміщувати декілька графічних буферів високої роздільної здатності для реалізації технології подвійної буферизації (DoubleBuffering), що гарантує відтворення динамічного контенту без візуальних артефактів та розривів кадру. Крім того, великий обсяг пам'яті необхідний для зберігання масивних знакогенераторів (шрифтів), графічних спрайтів та палітр кольорів без постійного звернення до повільнішої зовнішньої флеш-пам'яті.

Проте головною архітектурною перевагою 32-бітних систем для задач керування світлодіодними матрицями є наявність розвиненої апаратної периферії, зокрема контролера прямого доступу до пам'яті. [14] Використання DMA дозволяє передавати масиви піксельних даних безпосередньо з оперативної пам'яті на цифрові виводи мікроконтролера абсолютно без участі обчислювального ядра процесора. Завдяки цьому досягається ідеально стабільна частота оновлення екрана, повністю усувається мерехтіння світлодіодів, а процесорний час вивільняється для виконання інших важливих завдань: опитування зовнішніх датчиків, обробки мережевих протоколів та підтримки роботи операційної системи реального часу.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 16   |

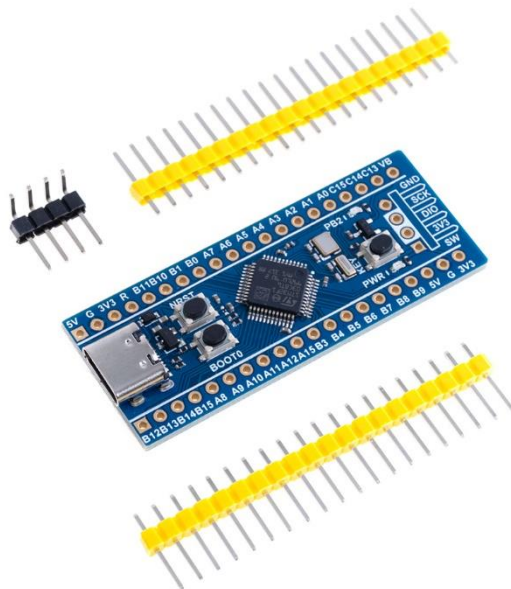
Аналіз даних, наведених у таблиці 1.1, беззаперечно доводить, що 8-бітні системи не володіють достатнім апаратним ресурсом для роботи з динамічною повноколірною графікою. Відповідно, використання 32-бітної архітектури є технічною необхідністю для побудови сучасних систем візуалізації з високою частотою оновлення, плавною анімацією та можливістю інтеграції в бездротові мережі.

Таблиця 1.1 – Порівняння архітектур мікроконтролерів

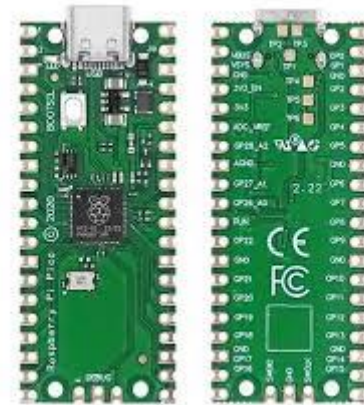
| Критерій порівняння               | 8-бітні архітектури                  | 32-бітні архітектури   |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Розрядність ядра та обробка даних | 8 біт за один машинний такт          | 32 біти за такт        |
| Робоча тактова частота            | Низька (8 – 20 МГц)                  | Висока (72 – 240 МГц)  |
| Обсяг оперативної пам'яті         | Критично малий (2 – 8 КБ)            | Значний (понад 500 КБ) |
| Можливість подвійної буферизації  | Неможлива (брак пам'яті)             | Повністю підтримується |
| Апаратний контролер DMA           | Відсутній (виведення лише через CPU) | Наявний                |
| Бездротові інтерфейси             | Відсутні                             | Апаратно інтегровані   |
| Робота з матрицями HUB75          | Непридатні                           | Оптимальні             |

#### 1.4 Порівняльна характеристика мікроконтролерів та обґрунтування вибору платформи ESP32

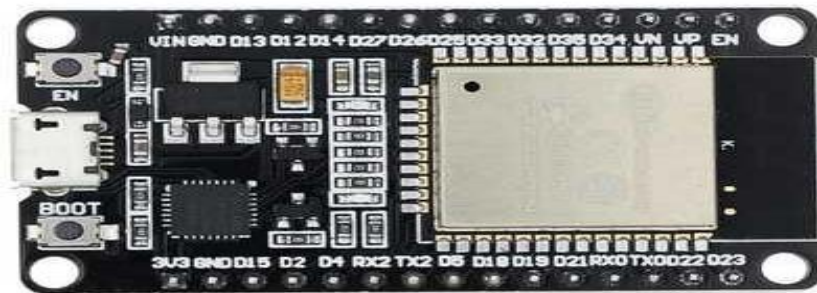
Для успішної реалізації апаратно-програмного комплексу керування світлодіодною матрицею необхідно обрати мікроконтролер, який здатен одночасно забезпечувати жорсткий часовий контроль для динамічної індикації, обробляти масиви графічних даних та підтримувати зв'язок із зовнішнім світом. На сучасному ринку 32-бітних вбудованих систем найбільш релевантними кандидатами є мікроконтролери родини STM32, чіп RP2040 та платформа ESP32 від компанії EspressifSystems (рис. 1.1 а,б,в).



а)



б)



в)

Рисунок 1.1 – Сучасні 32-бітні мікроконтролери: а) Плата STM32; б) плата Raspberry Pi Pico (на базі чипа RP2040); в) плата ESP32 DevKit

Аналізуючи обчислювальну потужність, варто зазначити, що типові представники бюджетної лінійки STM32 побудовані на одному ядрі з частотою близько 72–84 МГц [25]. Хоча деякі з них підтримують обчислення з плаваючою комою, їхня одноядерна архітектура неминуче стає вузьким місцем при необхідності одночасно приймати мережеві пакети та генерувати сигнали для матриці. Чіп RP2040 пропонує два ядра з частотою 133 МГц, але має дещо спрощену систему команд [22]. Натомість мікроконтролер ESP32 побудований на базі високопродуктивного двоядерного процесора Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц [13]. Наявність двох незалежних ядер дозволяє фізично

розділити завдання в операційній системі реального часу: одне ядро виділяється виключно для опитування зовнішніх датчиків та математичної обробки телеметрії, тоді як інше безперервно та без затримок генерує плавне відтворення динамічного контенту [15].

Важливим фактором є обсяг оперативної пам'яті, оскільки керування повноколірними LED-матрицями стандарту HUB75 вимагає значних ресурсів для реалізації алгоритмів подвійної буферизації та модуляції яскравості. Якщо базові моделі STM32 з їхніми 20–64 КБ пам'яті фізично не здатні вмістити графічні буфери для матриць високої роздільної здатності, а RP2040 пропонує 264 КБ, то ESP32 володіє 520 КБ внутрішньої пам'яті. Окрім обсягу пам'яті, критичною є наявність відповідної апаратної периферії для роботи з графікою. Оскільки матриці не мають власних відеоконтролерів і вимагають безперервної подачі даних на високій швидкості, в архітектурах STM32 та RP2040 доводиться використовувати стандартні порти вводу-виводу спільно з таймерами. Платформа ESP32 вирішує цю проблему на апаратному рівні завдяки контролеру I2S, який працює в паралельному режимі[14]. У поєднанні з контролером прямого доступу до пам'яті (DMA) це дозволяє виводити графіку безпосередньо на піни матриці абсолютно без участі центрального процесора.

Для сучасних систем візуалізації не менш критичною вимогою є можливість дистанційного керування та повноцінної інтеграції в мережі Інтернету речей (IoT). Більшість контролерів STM32 та базова версія RP2040 не мають вбудованих радіомодулів, що змушує використовувати зовнішні компоненти, ускладнюючи апаратну розробку та створюючи обмеження у швидкості обміну даними. Платформа ESP32 має апаратно інтегровані модулі Wi-Fi та Bluetooth безпосередньо на одному кристалі. Це дозволяє пристрою підключатися до локальних мереж, піднімати власний веб-сервер для зручного налаштування параметрів відображення через браузер та здійснювати бездротове оновлення мікропрограми (OTA), що є незамінним для інсталяцій у важкодоступних місцях [24].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Таким чином, проведений аналіз доводить, що платформа ESP32 є найбільш оптимальним та обґрунтованим вибором. Вона ідеально поєднує високу обчислювальну потужність двоядерної архітектури, великий обсяг пам'яті, унікальні можливості апаратного виведення графіки та безшовну інтеграцію з бездротовими мережами, дозволяючи створити сучасний, надійний та гнучкий комплекс візуалізації.

### **Висновки за розділом 1**

У першому розділі проведено детальний аналіз проблематики сучасних засобів візуалізації даних в умовах стрімкого розвитку Інтернету речей (IoT), систем автоматизації промисловості та концепцій розумного міста. Було обґрунтовано доцільність використання матричних індикаторів, оглянуто існуючі аналоги систем керування ними, а також виконано глибоку порівняльну характеристику сучасних мікроконтролерів.

За результатами дослідження можна зробити наступні висновки:

Встановлено, що використання саме світлодіодних (LED) матричних структур є найбільш ефективним рішенням для побудови інформаційних табло завдяки їхній високій яскравості, довговічності та модульності (можливості масштабування екрана до будь-яких розмірів). Проте існуючі на ринку системи для керування такими матрицями мають ряд недоліків: традиційні 8-бітні платформи вичерпали свої обчислювальні можливості для виведення динамічної графіки, а готові комерційні контролери мають закриту архітектуру та є апаратно надмірними для локальних завдань чи HMI-інтерфейсів.

Визначено, що найбільш перспективним підходом для керування матричними екранами є перехід на 32-бітну архітектуру з підтримкою контролера прямого доступу до пам'яті (DMA). Це дозволяє розвантажити центральний процесор від рутинного програмного генерування сигналів для матриці, ефективно реалізувати подвійну буферизацію та усунути мерехтіння зображення.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Аналіз виявив беззаперечну перевагу мікроконтролера ESP32 як базової платформи для проекту порівняно з іншими 32-бітними системами. Ця перевага зумовлена високопродуктивною двоядерною архітектурою (240 МГц), значним обсягом пам'яті (520 КБ) для роботи з матрицями високої роздільної здатності, а також унікальною апаратною інтеграцією модулів бездротового зв'язку. Наявність апаратного інтерфейсу I2S у поєднанні з DMA робить ESP32 ідеальним інструментом для прямого виведення даних на LED-матриці.

На основі вищевикладеного сформульовано технічне завдання на розробку власного пристрою – апаратно-програмного комплексу керування світлодіодною матрицею. Даний пристрій повинен забезпечувати стабільне відтворення графіки, паралельно обробляти зовнішні дані та підтримувати бездротове підключення для віддаленого управління.

Таким чином, розробка комплексу на базі матричної структури та контролера ESP32 є актуальним завданням, що дозволяє створити універсальну, масштабовану та відкриту платформу, здатну забезпечити миттєву візуалізацію даних у системах розумного міста, промисловій телеметрії та рекламі.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р1 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 21   |

|             |      |              |        |      |                                                                         |  |  |
|-------------|------|--------------|--------|------|-------------------------------------------------------------------------|--|--|
|             |      |              |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2                                                 |  |  |
|             |      |              |        |      |                                                                         |  |  |
| Змн.        | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата | АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ<br>КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ<br>СВІТЛОДІОДНОЮ<br>МАТРИЦЕЮ |  |  |
| Розробив    |      | Крук В.О.    |        |      |                                                                         |  |  |
| Керівник    |      | Козлов М.О.  |        |      |                                                                         |  |  |
| Консульт.   |      |              |        |      |                                                                         |  |  |
| Н. контроль |      | Грешнов А.Ю. |        |      |                                                                         |  |  |
| Зав. каф.   |      |              |        |      | НУК ім. ам. Макарова                                                    |  |  |

## РОЗДІЛ 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ КЕРУВАННЯ СВІТЛОДІОДНОЮ МАТРИЦЕЮ

### 2.1 Аналіз засобів формування зображення: готові світлодіодні матриці та адресні стрічки

Для розробки засобів візуалізації інформації на базі світлодіодних технологій на сучасному етапі найчастіше використовують два основні підходи: застосування адресних світлодіодних стрічок на базі інтегрованих чіпів (наприклад, WS2812B [26] або SK6812 [19]) та використання готових світлодіодних матричних модулів, які працюють за стандартом HUB75. Обидва варіанти мають суттєві архітектурні відмінності, які визначають їхню доцільність для конкретних інженерних завдань.

Адресні світлодіодні стрічки являють собою гнучкі друковані плати, де в кожен RGB-світлодіод вбудована мініатюрна мікросхема-контролер(рис. 2.1). Передача даних у таких системах здійснюється послідовно: керуючий сигнал проходить по одній лінії зв'язку, при цьому кожен піксель зчитує свої біти кольору, а залишок інформації ретранслює наступному елементу в ланцюгу. Головною перевагою цього підходу є надзвичайна простота підключення, що вимагає мінімальної кількості контактів, та гнучкість формфактора для створення індикаторів нестандартних форм.

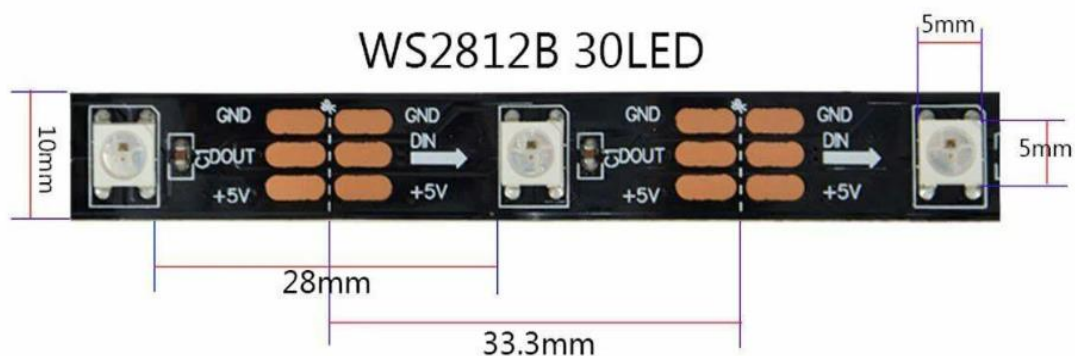


Рисунок 2.1 – Конструктивні особливості, контакти підключення та габаритні розміри адресної світлодіодної стрічки на базі чіпів WS2812B

Однак для побудови повноцінних інформаційних дисплеїв адресні стрічки мають ряд критичних недоліків. Насамперед це низька щільність розміщення світлодіодів, де крок пікселя зазвичай становить від шістнадцяти до тридцяти трьох міліметрів, що робить неможливим читання дрібного тексту чи відображення деталізованої інфографіки. Крім того, послідовний протокол передачі даних має жорстко фіксовану частоту. Час оновлення одного кадру для ланцюга адресних світлодіодів визначається залежністю:

$$T_{frame} = N_{pix} \times n_{bit} \times t_{bit}, \quad (2.1)$$

де  $N_{pix}$  – загальна кількість пікселів у ланцюгу;  $n_{bit}$  – кількість біт на один піксель (для RGB  $n_{bit} = 24$ );  $t_{bit}$  – тривалість передачі одного біта (для WS2812B  $t_{bit} \approx 1,25$  мкс).

Наприклад, для екрана з 1024 пікселів ( $32 \times 32$ ) час оновлення одного кадру становитиме:

$$T_{frame} = 1024 \times 24 \times 1,25 = 30720 \text{ мкс} \approx 30,7 \text{ мс}, \quad (2.2)$$

що відповідає максимальній частоті оновлення лише  $\approx 33$  Гц. При збільшенні кількості пікселів частота кадрів лінійно знижується, що унеможливорює плавне відображення динамічного контенту без видимого мерехтіння.

Альтернативним та значно ефективнішим рішенням є використання готових світлодіодних матричних модулів (рис. 2.2). Це промислово виготовлені плати, на яких з максимальною щільністю розміщені світлодіоди, а керування здійснюється за допомогою розміщених на зворотному боці зсувних регістрів та мультиплексорів. Такі матриці не мають вбудованого мікроконтролера і вимагають безперервної подачі масивів даних, сигналів вибору рядків та високочастотних тактових імпульсів за паралельним інтерфейсом.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 24   |

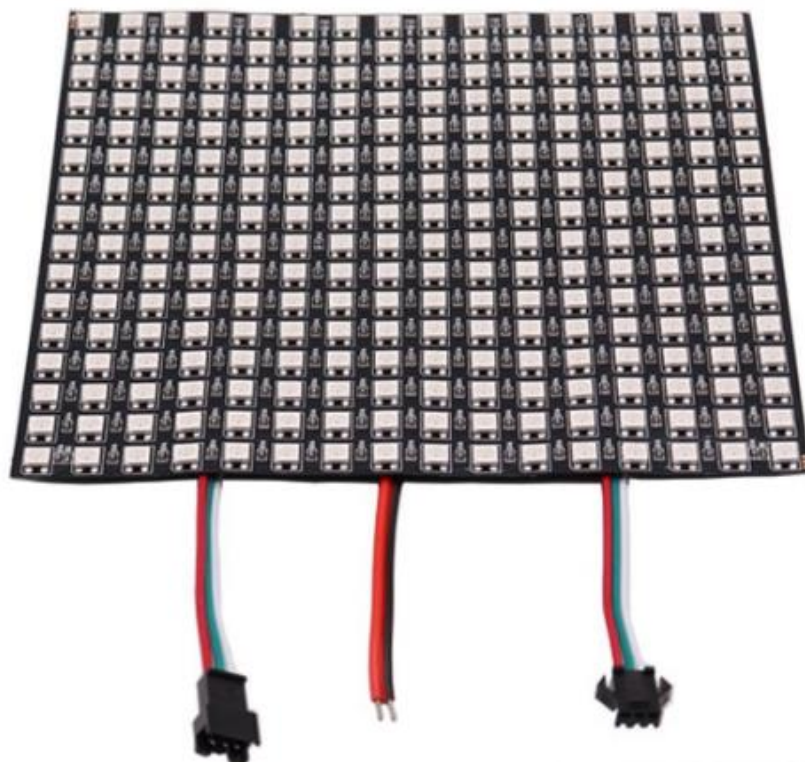


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд гнучкої адресної світлодіодної матриці на базі чіпів WS2812B

Завдяки високій щільності пікселів (з кроком від 1.2 до 5 міліметрів) промислові модулі забезпечують відмінну деталізацію та читабельність тексту навіть з близької відстані. Паралельна передача кольорових даних дозволяє керуючому мікроконтролеру оновлювати екран з частотою у сотні або навіть тисячі герц, а конструкція самих модулів розрахована на безшовне каскадне з'єднання для масштабування площі екрана. Хоча цей підхід вимагає складнішої апаратної обв'язки та використання значної кількості ліній вводу-виводу, ці вимоги легко задовольняються ресурсами сучасних 32-бітних мікроконтролерів, що робить готові LED-матриці оптимальною базою для розробки професійних інформаційних табло.

## **2.2 Методика побудови матриць довільної роздільної здатності, принципи каскадування та особливості їх підключення**

При конструюванні матриць довільної форми або нестандартної роздільної здатності критично важливим етапом є визначення топології прокладання

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 25   |

інформаційної шини. Оскільки програмне забезпечення мікроконтролера повинно точно знати фізичні координати кожного пікселя для коректного рендерингу зображення, розробнику необхідно задати точку підключення та початковий напрямок провідника. На рисунку 2.3 наведено базові варіанти конфігурації топології підключення, які враховуються при програмному налаштуванні системи.



Рисунок 2.3 – Варіанти топології прокладання інформаційної шини при конструюванні матриць довільної роздільної здатності

Однією з ключових переваг використання промислових світлодіодних матриць стандарту HUB75 є їхня модульна архітектура, яка дозволяє створювати екрани практично будь-яких розмірів та довільної роздільної здатності. Окремі матричні панелі, що зазвичай мають базову роздільну здатність 64x32 або 64x64 пікселі, виступають у ролі стандартизованих будівельних блоків (рис. 2.4) [8]. Збільшення загальної площі відображення досягається шляхом їх каскадного з'єднання, що на апаратному рівні реалізується завдяки наявності на кожному модулі двох роз'ємів: вхідного (HUB75 IN) та вихідного (HUB75 OUT) порту даних.

16\*16 Panel

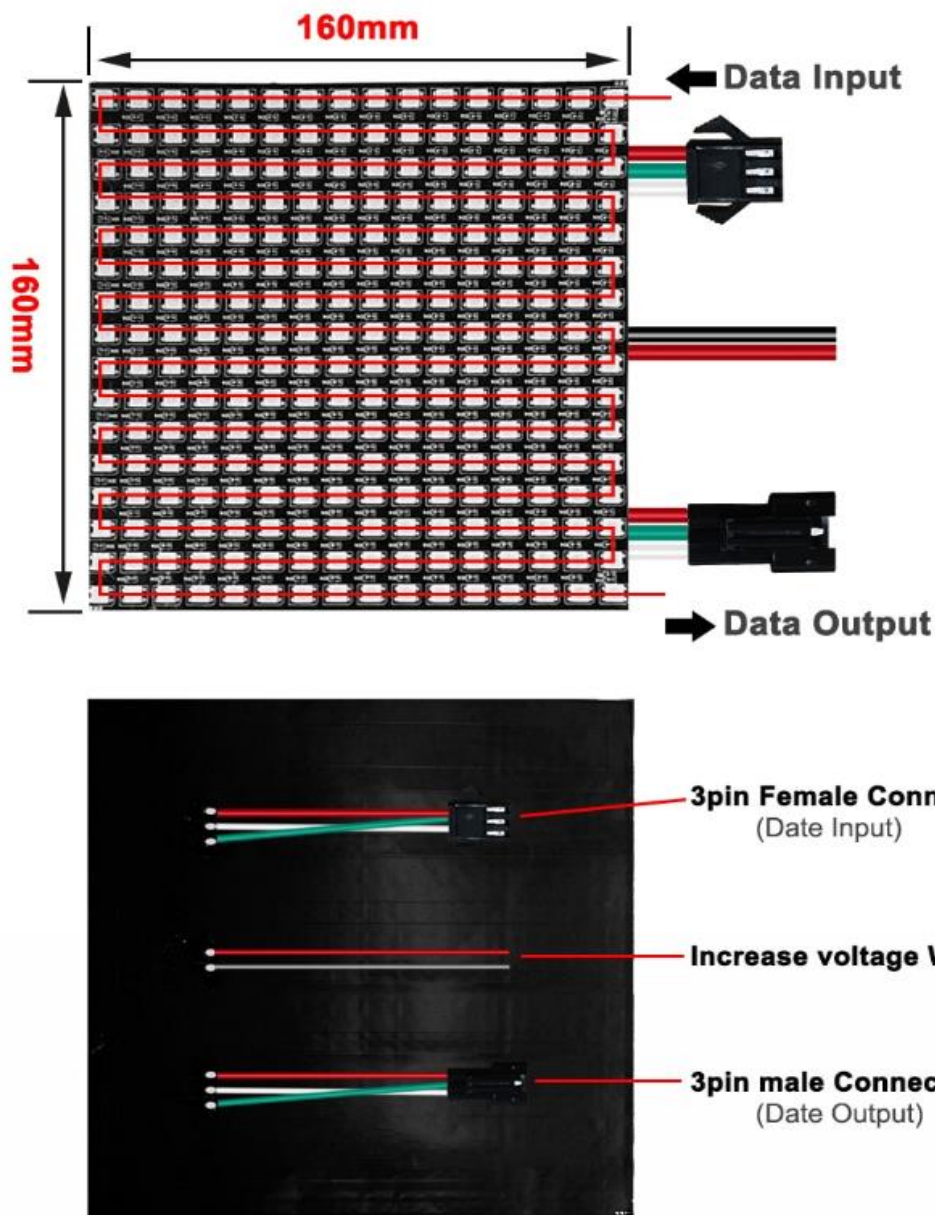


Рисунок 2.4 –Фізична структура та схема маршрутизації сигналу світлодіодної панелі

Принцип каскадування інформаційних сигналів базується на топології послідовного ланцюга, що безпосередньо зумовлено внутрішньою структурою матриці на базі зсувних регістрів. Керуючий мікроконтролер підключається виключно до вхідного роз'єму першої панелі в ланцюгу. Під час передачі кадру масиви графічних даних послідовно заштовхуються у зсувні регістри першої

матриці. Коли її внутрішня пам'ять заповнюється, кожен наступний тактовий імпульс призводить до переповнення і витискання даних через вихідний роз'єм на вхідний роз'єм наступної, підключеної шлейфом панелі. Таким чином, з точки зору апаратної передачі сигналів для мікроконтролера, каскад із кількох матриць виглядає як одна суцільна довга матриця з пропорційно збільшеною кількістю пікселів по горизонталі.

Важливим інженерним аспектом при каскадуванні є збереження цілісності високочастотних сигналів. Оскільки інтерфейс HUB75 використовує паралельну шину даних та загальні високочастотні лінії тактування і засувки, проходження сигналу через довгий ланцюг модулів може супроводжуватися електромагнітними спотвореннями та затуханням. Для вирішення цієї проблеми на кожній матричній платі встановлюються спеціалізовані мікросхеми-буфери, які здійснюють апаратну регенерацію керуючих сигналів перед їх передачею на наступний модуль. Це дозволяє формувати довгі каскади без ризику втрати даних або виникнення графічних артефактів. Разом з тим, довжина плоских з'єднувальних шлейфів між панелями повинна бути мінімальною для зниження паразитної ємності та індуктивності ліній зв'язку.

Збільшення роздільної здатності екрана шляхом каскадування безпосередньо впливає на часові характеристики системи відображення. Оскільки дані передаються послідовно, кожен додатковий модуль у ланцюгу пропорційно збільшує загальну довжину масиву, який необхідно передати мікроконтролеру для формування одного кадру. Для збереження прийнятної частоти оновлення екрана та уникнення помітного для людського ока мерехтіння виникає потреба у значному підвищенні тактової частоти інтерфейсу. У системах на базі ESP32 ця проблема ефективно вирішується завдяки використанню контролера прямого доступу до пам'яті (DMA), який здатен виштовхувати дані у каскад зсувних регістрів на частотах до 20 МГц без надмірного навантаження на обчислювальне ядро процесора.

Для формування прямокутних екранів довільних пропорцій панелі об'єднуються у складніші двовимірні конфігурації. Для створення високих

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

дисплеїв панелі фізично розташовують у декілька рядів, утворюючи змієподібну або зигзагоподібну топологію з'єднання шлейфів (дані передаються від останньої матриці першого ряду до першої матриці другого ряду). На програмному рівні мікроконтролер має враховувати цю фізичну конфігурацію шляхом використання алгоритмів мапінгу: складного математичного перетворення двовимірних декартових координат пікселів загального екрана у відповідні лінійні індекси одновимірного масиву графічного буфера в оперативній пам'яті.

Окрему і критично важливу увагу при побудові каскадних матричних екранів необхідно приділяти підсистемі живлення. Максимальний струм споживання однієї повноколірної матриці 64×32 пікселі при одночасному світінні всіх каналів на максимальній яскравості визначається за формулою:

$$I_{max} = W \times H \times N_{ch} \times I_{led}, \quad (2.3)$$

де  $I_{led}$  – максимальний струм одного кольорового каналу світлодіода (зазвичай  $\approx 20$  мА).

Для матриці 64×32 пікселі під час світіння білим кольором на максимальній яскравості здатна споживати до 4 ампер струму. Максимальна потужність, що розсіюється однією панеллю:

$$P_{panel} = I_{max_{pract}} \times U = 4 \times 5 = 20 \text{ Вт}. \quad (2.4)$$

Тому підключення живлення повинно реалізовуватися виключно за топологією «зірка», за якої від потужного імпульсного джерела живлення до кожної панелі прокладається окрема силова лінія (рис. 2.5).

Крім того, імпульсний характер споживання струму під час роботи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) світлодіодів створює значні перешкоди в колах живлення. Для їх нейтралізації біля клем живлення кожної панелі доцільно використовувати електролітичні конденсатори великої ємності, які згладжують пікові навантаження та стабілізують рівень напруги, що в сукупності гарантує рівномірну яскравість та коректне відтворення кольорів по всій площі зібраного дисплея.

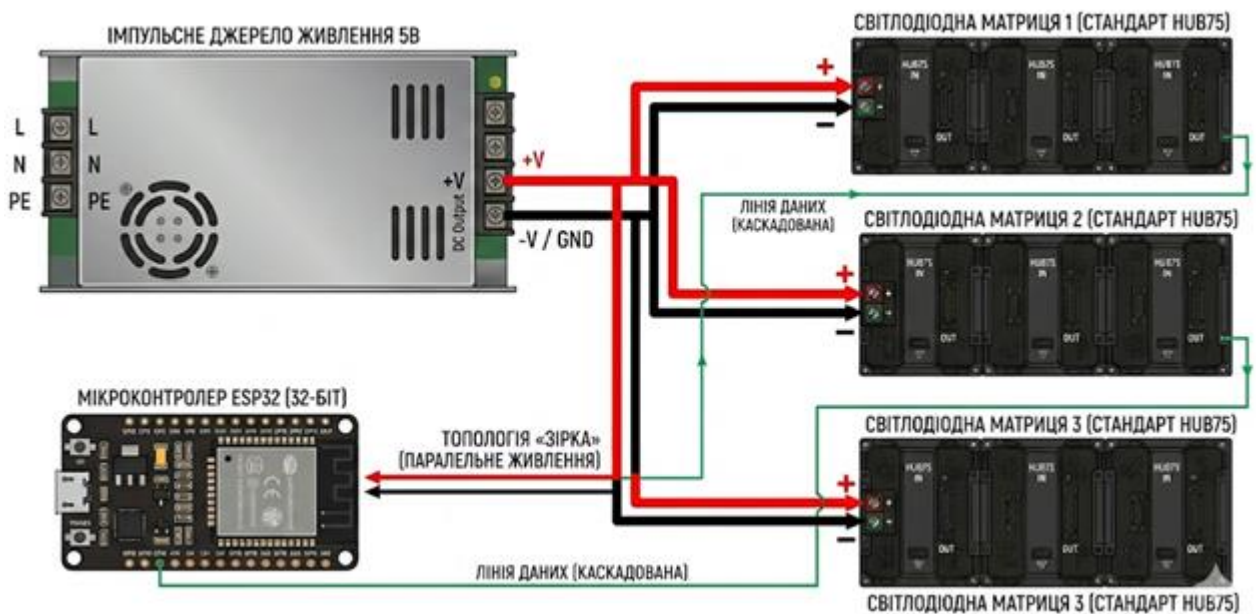


Рисунок 2.5 – Схема підключення живлення та даних для каскаду матриць HUB75 та ESP32

### 2.3 Апаратна архітектура мікроконтролера ESP32: технічні характеристики, призначення виводів та інтерфейси зв'язку

Основою розроблюваного апаратно-програмного комплексу є високоінтегрований мікроконтролер ESP32, який поєднує в собі потужні обчислювальні можливості та багату периферію. Його архітектура базується на використанні двоядерного 32-бітного процесора Xtensa LX6, який здатен працювати на тактовій частоті до 240 МГц. Така висока продуктивність, що забезпечує до 600 MIPS, є критично важливою для систем візуалізації, оскільки дозволяє паралельно виконувати складні математичні обчислення, обробляти мережеві пакети та генерувати графічний контент. Внутрішня пам'ять мікроконтролера включає 520 КБ оперативної пам'яті (SRAM) для зберігання даних та інструкцій, а також вбудовану постійну пам'ять (ROM) для завантажувача. Окрім цього, мікроконтролер підтримує підключення зовнішньої флеш-пам'яті по інтерфейсу SPI (найчастіше обсягом 4 МБ), де зберігається основний програмний код користувача та файлова система. Основні технічні характеристики обраної мікроконтролерної плати зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики мікроконтролера ESP32

| Параметр                         | Значення                                          |
|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| Мікроконтролер                   | ESP-WROOM-32<br>(на базі Tensilica Xtensa LX6)    |
| Робоча напруга (логічний рівень) | 3.3 В                                             |
| Вхідна напруга (рекомендована)   | 5–12 В                                            |
| Цифрові Входи/Виходи             | 34 (з них апаратний ШІМ на 16 каналів)            |
| Аналогові входи                  | 18                                                |
| Максимальний струм одного виводу | 40 мА                                             |
| Flash-пам'ять                    | 4 МБ                                              |
| SRAM                             | 520 КБ                                            |
| EEPROM                           | Відсутня (апаратно замінюється емуляцією у Flash) |
| Тактова частота                  | До 240 МГц                                        |
| Розміри плати                    | 51.5 x 28.3 мм                                    |

Для взаємодії з навколишнім середовищем та керування зовнішніми пристроями ESP32 володіє розвиненою системою портів загального призначення (GPIO). Загалом чіп має 34 фізичних виводи, проте їхнє використання вимагає ретельного аналізу під час проектування електричної схеми. Головною особливістю архітектури є те, що контакти з номерами 34, 35, 36 та 39 можуть працювати виключно в режимі входу і не мають внутрішніх підтягуючих резисторів [20]. Відповідно, їх неможливо використати для генерації вихідних сигналів на світлодіодну матрицю. Крім того, ряд контактів відповідають за вибір режиму завантаження мікроконтролера при подачі живлення. Неправильне підключення до цих виводів зовнішньої периферії може призвести до неможливості старту системи або неможливості прошивки пристрою.

На рисунку 2.6 наведено зовнішній вигляд та детальну схему призначення виводів (pinout) обраної налагоджувальної плати ESP32 DevKit V1.

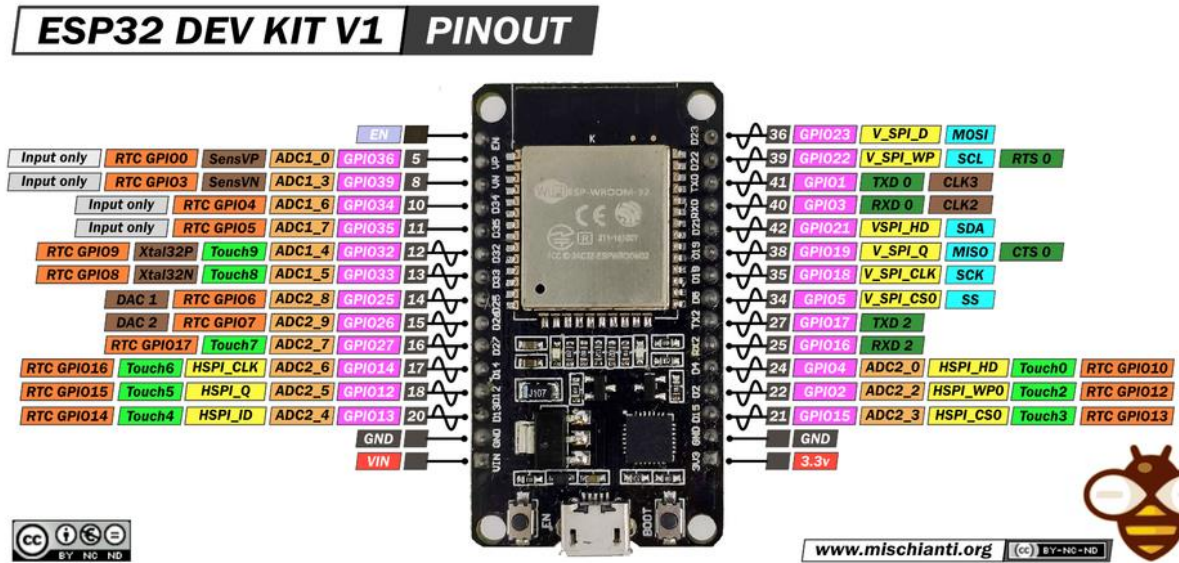


Рисунок 2.6 – Схема призначення виводів налагоджувальної плати ESP32 DevKitV1

Усі повнофункціональні виводи GPIO оснащені внутрішньою матрицею мультиплексування. Це означає, що розробник має змогу програмно перепризначити більшість апаратних інтерфейсів на будь-які зручні для розведення плати контакти. Мікроконтролер підтримує широкий спектр стандартних комунікаційних протоколів: три контролери UART для послідовного обміну даними, три шини SPI та два інтерфейси I2C для підключення різноманітних датчиків. Проте найважливішим інтерфейсом у контексті даної роботи є наявність контролера I2S (Inter-IC Sound). Хоча першочергово цей інтерфейс призначений для передачі цифрового звуку, в архітектурі ESP32 він має розширений паралельний режим роботи. Саме цей режим у комбінації з багатоканальним контролером прямого доступу до пам'яті (DMA) дозволяє здійснювати високошвидкісну апаратну передачу графічних даних на контакти матриці HUB75 взагалі без залучення ресурсів центрального процесора.

Окремим вагомим блоком апаратної архітектури є інтегрована радіочастотна підсистема. Чіп ESP32 містить повноцінні апаратні модулі для

роботи в мережах Wi-Fi стандарту 802.11 b/g/n на частоті 2.4 ГГц, а також підтримує протоколи класичного Bluetooth (v4.2 BR/EDR) та Bluetooth низького енергоспоживання (BLE). Радіомодуль об'єднує в собі антенний комутатор, радіочастотний балун, підсилювач потужності та приймач із низьким рівнем шуму. Налагоджувальна плата DevKit вже містить розведену на текстоліті антену, що усуває необхідність проектування власного радіотракту і забезпечує надійний бездротовий зв'язок для віддаленого керування пристроєм та оновлення прошивки по повітрю (OTA).

## 2.4 Розробка принципової електричної схеми пристрою

Розробка принципової електричної схеми є ключовим етапом проектування, який визначає точні фізичні зв'язки між усіма компонентами апаратно-програмного комплексу. На рисунку 2.7 наведено принципову схему базової обв'язки мікроконтролера ESP32, яка включає підключення периферійних пристроїв, модулів керування та підсистеми безпечного керування живленням силового навантаження.

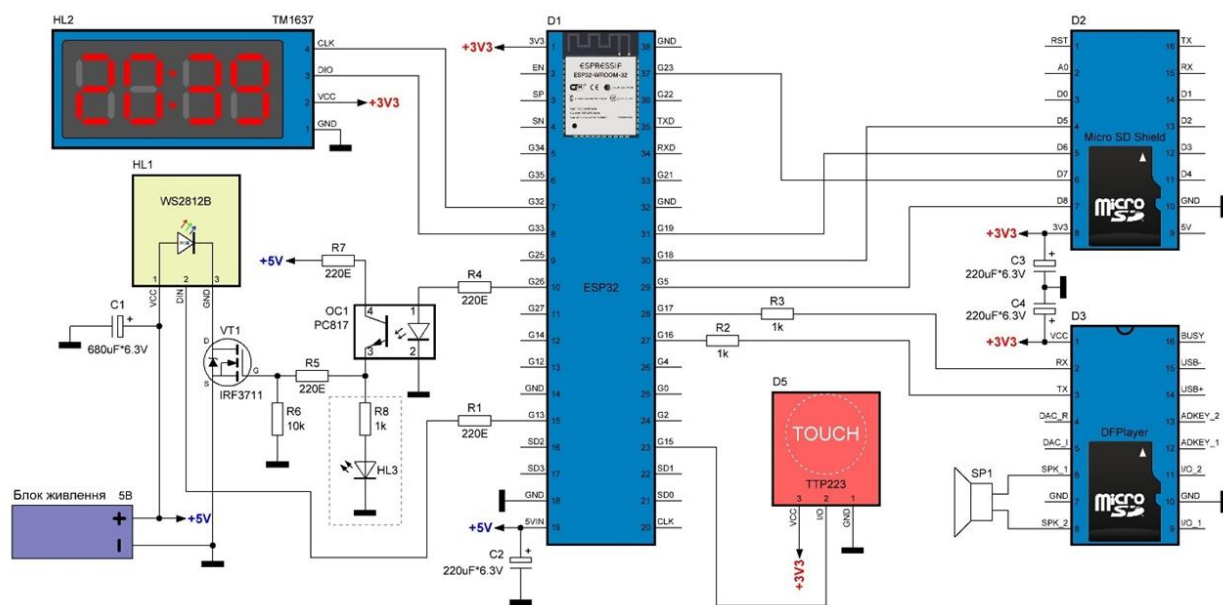


Рисунок 2.7 – Принципова електрична схема підключення периферійних пристроїв та підсистеми керування живленням до мікроконтролера ESP32

Ядром представленої системи є мікроконтролер платформи ESP32 (на схемі позначений як D1), який працює з логічними рівнями 3.3 В. Він відповідає за

виконання основного мікропрограмного забезпечення, підключення до бездротової мережі Wi-Fi, обробку сигналів від датчиків та формування керуючого потоку даних. Для забезпечення локального керування пристроєм, наприклад, зміни режимів роботи чи ручного вимкнення, до мікроконтролера підключено ємнісний сенсорний модуль TTP223 (D6). Використання саме сенсорної технології гарантує подачу чистих логічних рівнів без паразитних перехідних процесів, відомих як «брязкіт контактів», що звільняє процесор від необхідності програмної фільтрації вхідних сигналів.

Оскільки світлодіодні матриці споживають значний струм навіть у програмно вимкненому стані, у схемі реалізовано вузол апаратного відключення силової частини, яка на кресленні умовно позначена загальним блоком HL1. Для безпечного керування цим навантаженням використовується оптопара PC817 (OC1), що виконує роль надійної гальванічної розв'язки. Вона повністю оптично ізолює слабкострумову керуючу лінію мікроконтролера від силового ланцюга 5 В, захищаючи порти ESP32 від можливих стрибків напруги. При подачі керуючого сигналу оптопара відкриває потужний N-канальний MOSFET-транзистор IRF3711 (VT1), який працює в ключовому режимі і замикає ланцюг живлення матриці, про що додатково сигналізує світлодіод-індикатор HL3 [17].

Для розширення функціоналу комплексу передбачено додаткову периферію. Зокрема, 4-розрядний 7-сегментний дисплей на базі драйвера TM1637 (HL2) взаємодіє з мікроконтролером по цифровій двопровідній шині та слугує для виведення базової системної інформації, як-от поточний час або температура, у моменти, коли основний екран вимкнено задля економії енергії. Мультимедійні можливості реалізовані за допомогою апаратного аудіо декодера DFPlayerMini (D3), що підключений через інтерфейс UART і відтворює звукові ефекти або голосові сповіщення через динамік SP1. Для енергонезалежного зберігання аудіотреків та масивів даних анімації використовується модуль Micro SD Shield (D2), що працює по високошвидкісному інтерфейсу SPI.

Загальне живлення пристрою напругою 5 В забезпечується зовнішнім промисловим імпульсним блоком живлення. Для стабілізації напруги та

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

поглинання високочастотних пульсацій, які неминуче виникають під час швидкого перемикання світлодіодів (роботи ШІМ) та функціонування аудіопідсистеми, паралельно лініям живлення кожного модуля інтегровані електролітичні фільтруючі конденсатори відповідної ємності, зокрема C1 на 680 мкФ та група конденсаторів C2, C3 і C4 на 220 мкФ.

### 2.4.1 Вибір та розрахунок електронної обв'язки

Оскільки в даному проекті використовується готова відлагоджувальна плата мікроконтролера (ESP32 DevKit), усі необхідні strapping-резистори для коректного завантаження процесора (на лініях GPIO 0, 2, 5, 12, 15) вже фізично інтегровані на самій платі виробником. Тому розробка зовнішньої електронної обв'язки фокусується на забезпеченні стабільної роботи силової та периферійної частин схеми (рис. 2.8).

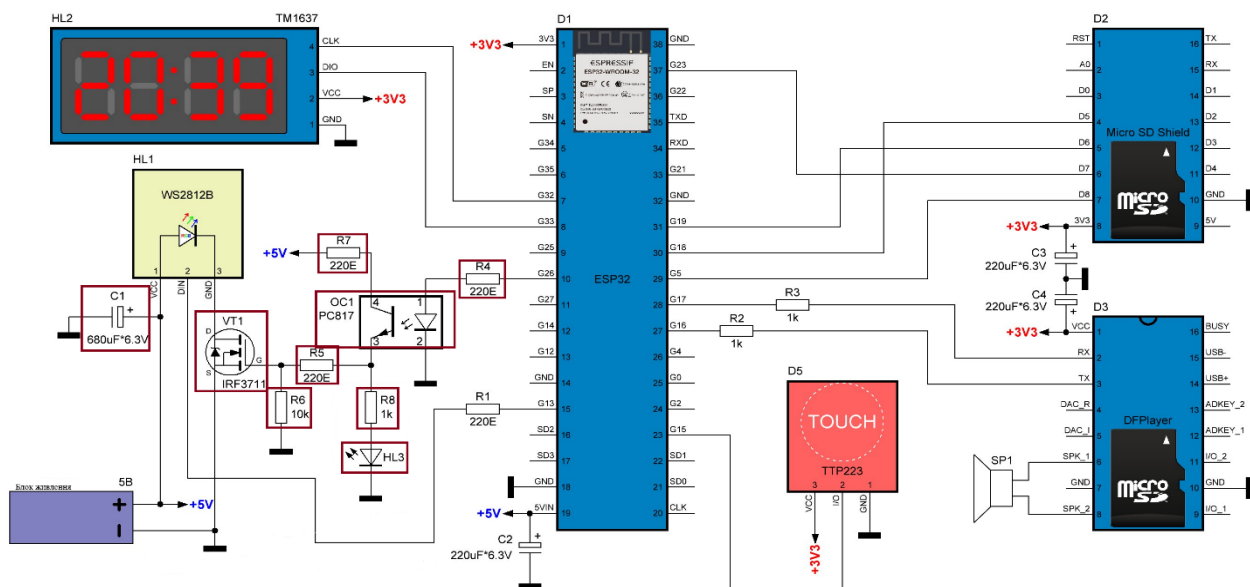


Рисунок 2.8 – Виділення блоку електронної обв'язки силової частини на принциповій схемі

Для надійного керування силовим ключем на базі MOSFET-транзистора (VT1) та захисту портів мікроконтролера розраховано струмообмежувальний резистор R4 для оптопари OC1 (PC817). Його номінал визначається за формулою:

$$R_4 = (V\_GPIO - V\_F(LED))/(I\_F), \quad (2.5)$$

де  $V\_GPIO = 3,3$  В – логічний рівень виходу ESP32;  $V\_F(LED) \approx 1,2$  В – пряме падіння напруги на випромінюючому діоді оптопари;  $I\_F = 10$  мА – робочий струм діода.

Підставивши значення, отримаємо:

$$R_4 = (3,3 - 1,2)/0,01 = 210 \text{ Ом}. \quad (2.6)$$

З ряду стандартних номіналів обрано резистор  $R_4 = 220$  Ом, що забезпечує робочий струм  $I\_F \approx 9,5$  мА – достатній для надійного відкриття оптопари.

Резистор  $R_6$  (10 кОм) виконує функцію підтяжки (Pull-down) затвора транзистора до потенціалу землі. Це гарантує його надійно закритий стан за відсутності керуючого сигналу та запобігає хибним спрацьовуванням від електромагнітних наведень.

Потужність, що розсіюється на лінійному стабілізаторі (LDO) плати ESP32 при перетворенні напруги з 5 В до 3,3 В, визначається за формулою:

$$P_{LDO} = (V_{\text{вх}} - V_{\text{вих}}) \times I_{\text{навант}}, \quad (2.7)$$

де  $I_{\text{навант}}$  – струм споживання мікроконтролера (до 500 мА при активному Wi-Fi). Таким чином:

$$P_{LDO} = (5 - 3,3) \times 0,5 = 0,85 \text{ Вт}. \quad (2.8)$$

#### 2.4.2 Інтеграція додаткових модулів, кнопок керування та підсистеми живлення

Окрім базових компонентів, розробка надійної підсистеми живлення вимагає впровадження засобів апаратного захисту та температурного менеджменту. Оскільки лінійний стабілізатор напруги (LDO), інтегрований на платі мікроконтролера ESP32, знижує напругу з 5 В до робочих 3.3 В, він виділяє тепло під час роботи. Тому для запобігання перегріву обчислювального ядра, основне силове навантаження живиться безпосередньо від зовнішнього джерела, обминаючи LDO мікроконтролера. Для наочної демонстрації інтеграції цих

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

вузлів, на рисунку 2.9 червоним кольором виділено відповідні блоки периферії та живлення на загальній принциповій схемі комплексу.

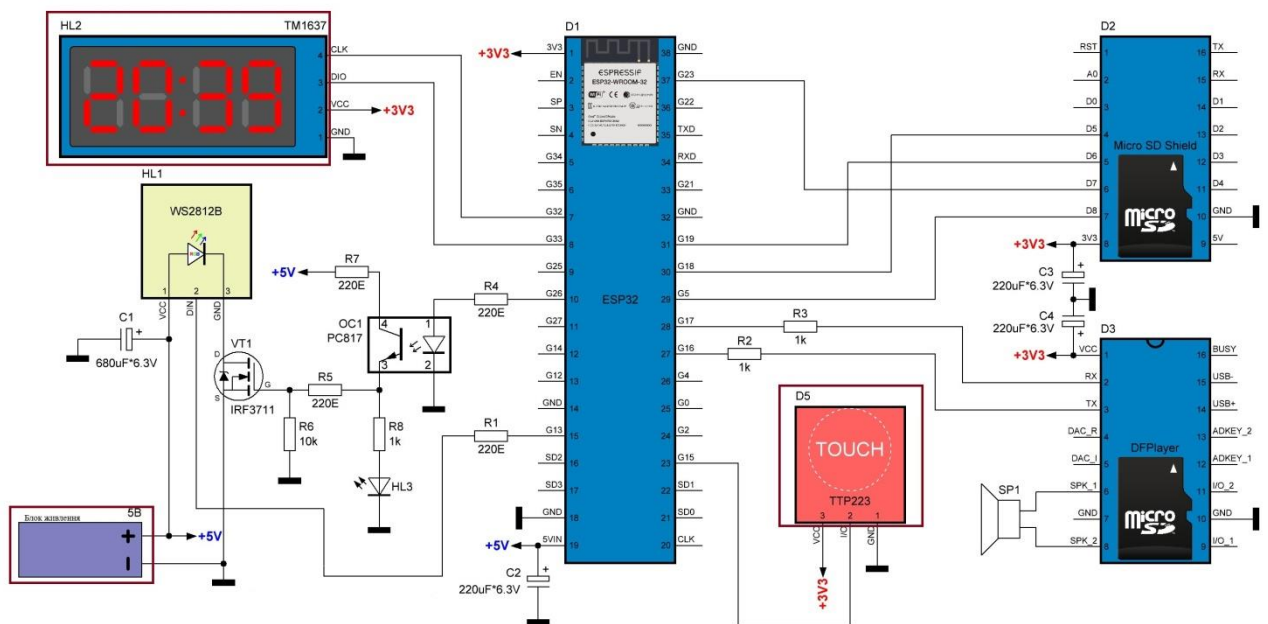


Рисунок 2.9 – Виділення блоків додаткової периферії, керування та підсистеми живлення на принциповій схемі

Згідно з виділеними ділянками, інтеграція реалізована з урахуванням апаратних вимог кожного модуля. Підсистема живлення побудована від загального зовнішнього джерела напруги 5 В, лінія від якого розділяється: одна гілка забезпечує живлення силового ключа матриці, а інша подається на вхід мікроконтролера. Для забезпечення додаткової фільтрації електромагнітних завад та стабілізації напруги безпосередньо біля виводів ESP32 передбачено встановлення електролітичного конденсатора C2 ємністю 220 мкФ.

Необхідну ємність фільтрувального конденсатора  $C_1$  для силового ланцюга матриці можна оцінити за допомогою виразу:

$$C_1 \geq (I_{\text{имп}} \times \Delta t) / (\Delta U_{\text{доп}}) . \quad (2.9)$$

де  $I_{\text{імп}}$  – амплітуда імпульсного струму;  $\Delta t$  – тривалість імпульсу;  
 $\Delta U_{\text{доп}}$  – допустима пульсація напруги на шині живлення.

Обрано конденсатор C1 ємністю 680 мкФ для компенсації різких стрибків струму під час роботи ШІМ.

Модуль локального керування, реалізований на базі ємнісної сенсорної кнопки TTP223 (D5), інтегрований у систему з живленням від стабілізованої лінії 3.3 В, яку генерує сам мікроконтролер. Сигнальний вивід сенсора підключений безпосередньо до цифрового порту вводу-виводу ESP32 без необхідності використання зовнішніх підтягуючих резисторів, оскільки даний модуль оснащений власною вбудованою апаратною логікою обробки дотиків. Додатковий модуль індикації у вигляді 7-сегментного дисплея TM1637 (HL2) також підключений до загальної шини живлення та керується мікроконтролером по спеціалізованому двопровідному цифровому інтерфейсу. Критично важливою умовою надійної інтеграції як дисплея, так і решти периферійних пристроїв, є обов'язкова наявність фізично спільної шини землі (GND) з обчислювальним ядром, що необхідно для коректного вирівнювання логічних потенціалів по всій системі.

## Висновки за розділом 2

У другому розділі проведено комплексний аналіз сучасних засобів формування зображення, обґрунтовано вибір апаратної бази та здійснено детальне проектування структурної і принципової електричної схем пристрою керування світлодіодною матрицею з урахуванням специфіки високочастотної передачі даних та імпульсного енергоспоживання.

За результатами дослідження можна зробити наступні висновки:

Встановлено, що для створення сучасних інформаційних табло з високою роздільною здатністю та ідеальною читабельністю тексту технічно обґрунтованим рішенням є використання готових промислових світлодіодних матриць стандарту HUB75. Вони архітектурно та експлуатаційно значно перевершують звичайні адресні стрічки, оскільки забезпечують високу щільність пікселів, масштабованість екрана шляхом апаратного каскадного

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 38   |

з'єднання та підтримують високу частоту оновлення кадрів завдяки паралельному інтерфейсу передачі кольорових даних.

Визначено, що найкращою обчислювальною платформою для керуючого пристрою виступає 32-бітний мікроконтролер ESP32. Його двоядерна архітектура, висока тактова частота (до 240 МГц), наявність апаратного контролера прямого доступу до пам'яті (DMA) для керування паралельною шиною, а також вбудований радіо модуль Wi-Fi/Bluetooth повністю задовольняють жорсткі вимоги до обчислювальної потужності, швидкодії відмальовування графіки та забезпечення бездротового зв'язку.

Аналіз виявив критичну необхідність застосування спеціалізованої електронної обв'язки для забезпечення стабільності та завадостійкості системи. Зокрема, доведено обов'язковість апаратного узгодження логічних рівнів (від 3.3 В до 5 В) за допомогою швидкодіючих шинних формувачів, встановлення термінуючих струмообмежувальних резисторів для гасіння паразитних коливань у з'єднувальних шлейфах, а також жорстку потребу в організації надійної підсистеми живлення з використанням фільтруючих керамічних та потужних електролітичних конденсаторів.

На основі вищевикладеного сформульовано технічне завдання на розробку власного пристрою керування світлодіодною матрицею та спроектовано його загальну структурну і принципову електричну схеми. У розробленій архітектурі мікроконтролер ESP32 надійно поєднано із засобами відображення, багаторівневою системою стабілізованого живлення, елементами локального керування (із застосуванням RC-фільтрів для пригнічення брязкоту контактів) та периферійними модулями.

Таким чином, розробка апаратної частини комплексу на базі 32-бітного мікроконтролера та матриць стандарту HUB75 є актуальним завданням, що дозволяє створити надійну, автономну та масштабовану фізичну платформу. Ця платформа гарантує безперебійну передачу графічних даних, захист від електромагнітних завад і є повністю готовою базою для наступного етапу –

розробки мікропрограмного забезпечення та реалізації складних програмних алгоритмів візуалізації динамічного контенту.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р2 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

|             |      |              |        |      |                                                                |  |  |
|-------------|------|--------------|--------|------|----------------------------------------------------------------|--|--|
|             |      |              |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ                                        |  |  |
|             |      |              |        |      |                                                                |  |  |
| Змн.        | Арк. | № докум.     | Підпис | Дата | ПРОГРАМНЕ<br>ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА<br>ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ<br>КОМПЛЕКСУ |  |  |
| Розробив    |      | Крук В.О.    |        |      |                                                                |  |  |
| Керівник    |      | Козлов М.О.  |        |      |                                                                |  |  |
| Консульт.   |      |              |        |      |                                                                |  |  |
| Н. контроль |      | Грешнов А.Ю. |        |      |                                                                |  |  |
| Зав. каф.   |      |              |        |      | НУК ім. ам. Макарова                                           |  |  |

### РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ КОМПЛЕКСУ

Програмне забезпечення розробленого апаратно-програмного комплексу виступає ключовою ланкою, що забезпечує інтеграцію обчислювальних ресурсів мікроконтролера ESP32 із виконавчим пристроєм у вигляді світлодіодної матриці. Основна мета розробки мікропрограми полягала у створенні стабільної системи, здатної в реальному часі опрацьовувати вхідні дані, керувати динамічною візуалізацією та підтримувати бездротовий зв'язок без втрати частоти оновлення кадрів.

Для реалізації програмної частини було обрано середовище Arduino IDE та мову програмування C++, що дозволило досягти оптимального балансу між швидкістю розробки та продуктивністю готового коду [9]. В основі архітектури прошивки лежить використання спеціалізованої бібліотеки ESP32-HUB75-MatrixPanel-DMA [18]. Дане програмне рішення критично важливе для проекту, оскільки воно задіює апаратний контролер прямого доступу до пам'яті (DMA), що дозволяє передавати колірні дані на матрицю у фоновому режимі. Завдяки цьому обчислювальні ядра мікроконтролера звільняються від рутинних операцій генерації сигналів, що усуває ефект мерехтіння зображення та дозволяє реалізувати складні графічні ефекти з високою глибиною кольору.

Логіка роботи комплексу побудована за принципом багатозадачності. Після подачі живлення система виконує ініціалізацію периферійних модулів, включаючи налаштування шини I2C для взаємодії з годинником реального часу та ініціалізацію файлової системи на microSD-картці. Програмний алгоритм розділений на кілька паралельних потоків: генерація відеосигналу, рендеринг графічних примітивів або тексту, а також моніторинг стану органів керування та Wi-Fi з'єднання. Це забезпечує високу швидкість відгуку системи на зовнішні події та гарантує безперервність відображення інформації.

На завершальному етапі розробки було проведено комплексне тестування прототипу для верифікації його технічних характеристик. Перевірка стабільності

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 42   |

виведення зображення показала, що середня частота оновлення кадрів перевищує 120 Гц, що повністю відповідає вимогам до сучасних інформаційних табло та забезпечує комфортне візуальне сприйняття. Під час стрес-тестування підсистеми живлення в режимі максимальної яскравості (виведення статичного білого фону) було підтверджено надійність силових ліній та ефективність розрахованих заходів тепловідводу.

Окремо проводилося тестування бездротового інтерфейсу, яке підтвердило стабільність роботи вбудованого веб-сервера та можливість синхронізації часу за протоколом NTP у радіусі до 20 метрів від точки доступу. Також було перевірено стійкість програмного забезпечення до апаратного «брязкуту» кнопок та коректність обробки сигналів енкодера, що підтвердило надійність алгоритмів цифрової фільтрації. Результати тестування продемонстрували повну відповідність розробленого комплексу поставленим завданням, високу надійність програмно-апаратної взаємодії та готовність пристрою до практичної експлуатації.

### **3.1 Розробка алгоритму роботи базового програмного забезпечення мікроконтролера ESP32**

Для забезпечення стабільного функціонування апаратно-програмного комплексу розроблено багаторівневий подієво-орієнтований алгоритм, який дозволяє ефективно розподіляти обчислювальні ресурси мікроконтролера ESP32 між завданнями мережевого обміну та високочастотного оновлення динамічного зображення на матриці HUB75. Логічна послідовність роботи програмного забезпечення представлена на блок-схемі, що зображена на рис. 3.1. Алгоритм побудований за принципом нескінченного циклу (Super-loop) з попередньою стадією критичної конфігурації, що гарантує надійність системи та можливість автоматичного відновлення працездатності після збоїв мережевого з'єднання або короткочасних помилок передачі даних.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 43   |

### Блок-схема Wi-Fi годинника з NTP синхронізацією

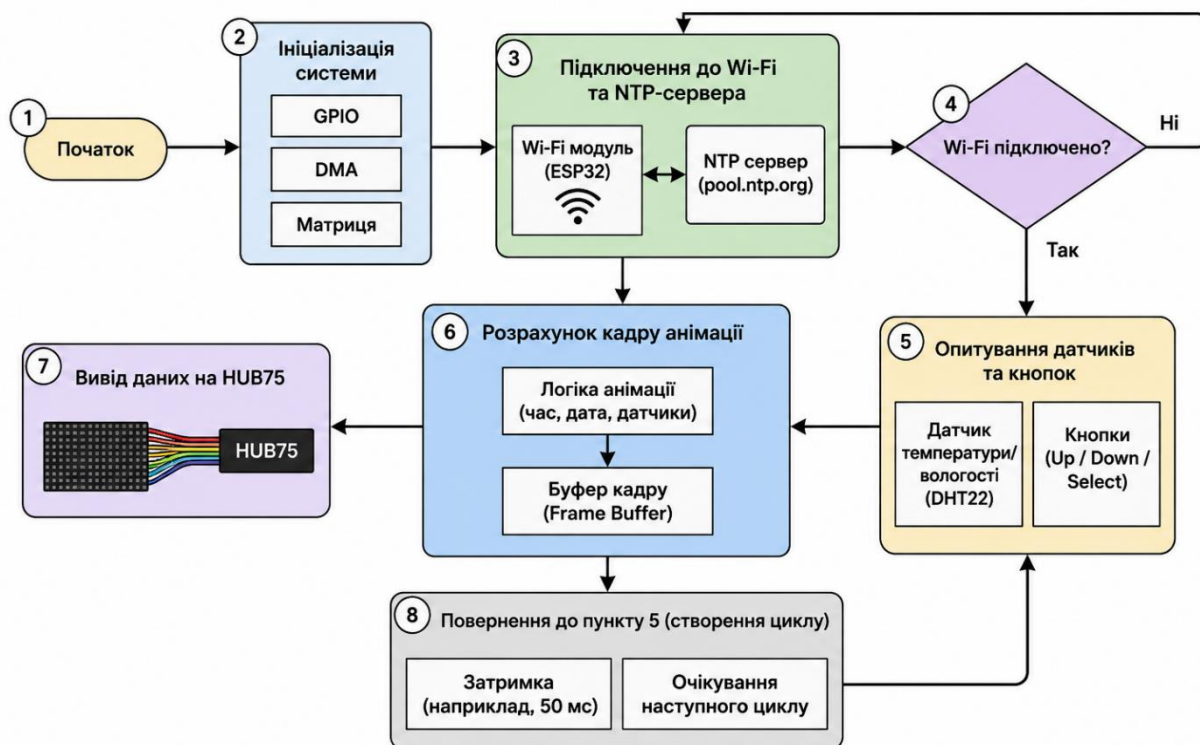


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму функціонування Wi-Fi годинника з NTP синхронізацією

Процес роботи пристрою починається зі стадії глибокої ініціалізації апаратної частини одразу після подачі живлення або апаратного скидання мікроконтролера. На цьому етапі програма виконує конфігурацію напрямку роботи периферійних портів GPIO та налаштовує спеціалізовану шину прямого доступу до пам'яті (DMA). Використання DMA є критично важливим для даного алгоритму, оскільки воно дозволяє пересилати дані з буфера кадру безпосередньо на роз'єм HUB75, звільняючи центральний процесор для виконання інших обчислювальних завдань. Після завершення апаратного налаштування алгоритм переходить до етапу встановлення бездротового мережевого зв'язку. Програма ініціює підключення до Wi-Fi точки доступу за протоколом WPA2 та, у разі успішної авторизації, виконує запит до глобальних серверів точного часу (NTP) для отримання актуальних часових міток, які згодом

використовуються для синхронізації внутрішнього годинника реального часу (RTC) [16].

Важливою архітектурною особливістю алгоритму є наявність логічного розгалуження на етапі підключення: у разі відсутності Wi-Fi сигналу або помилки авторизації система не блокується, а автоматично повертається до спроби встановлення зв'язку через певний проміжок часу, що забезпечує автономність та відмовостійкість пристрою в реальних умовах експлуатації. Після успішного проходження стадії синхронізації алгоритм входить у головний робочий цикл, де першочергово виконується опитування підключених датчиків температури та вологості повітря, а також зчитування логічного стану сенсорної кнопки керування для визначення поточних команд користувача.

На основі отриманих вхідних даних здійснюється розрахунок математичної моделі кадру анімації. На цьому етапі логіка програми формує графічні об'єкти, динамічні ефекти або цифрові значення годинника у спеціально виділеній ділянці оперативної пам'яті — буфері кадру (FrameBuffer). Сформований масив даних негайно передається на фізичний рівень світлодіодної матриці HUB75 для візуалізації. Завершальним етапом кожної ітерації робочого циклу є прецизійна програмна затримка. Вона необхідна не лише для витримки заданих таймінгів візуальних ефектів (стабілізації FPS), а й для надання часу фоновим процесам мікроконтролера, таким як підтримка TCP/IP стеку та обробка вхідних HTTP-запитів веб-інтерфейсу. Після завершення періоду очікування керування безперервно повертається до фази опитування сенсорів, утворюючи стійкий замкнений цикл роботи пристрою.

### **3.2 Конфігурація параметрів матриці та ініціалізація апаратних інтерфейсів**

Важливим етапом розробки програмного забезпечення є точне конфігурування параметрів світлодіодної матриці та ініціалізація апаратних інтерфейсів мікроконтролера ESP32, що забезпечує коректне відображення графічної інформації та стабільний обмін даними з периферійними пристроями.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 45   |

Оскільки матриці стандарту HUB75 не мають вбудованого інтелектуального контролера пам'яті, завдання формування розгортки, керування яскравістю та синхронізації сигналів повністю покладається на програмне ядро мікроконтролера.

Процес конфігурації починається з визначення геометричних та фізичних характеристик панелі в програмному коді. На цьому етапі задаються параметри роздільної здатності та тип сканування рядків, що визначає часові діаграми подачі сигналів вибору рядків через піни адресних ліній. Особлива увага приділяється налаштуванню глибини кольору та параметрів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Шляхом програмного налаштування частоти оновлення встановлюється баланс між навантаженням на центральний процесор та якістю зображення, щоб уникнути видимого мерехтіння та забезпечити коректну роботу пристрою при відеозйомці.

Для практичної реалізації описаних налаштувань у середовищі розробки використовується спеціалізована бібліотека, яка дозволяє конфігурувати роботу матриці через структуру налаштувань перед ініціалізацією шини. На рисунку 3.2 наведено розроблений фрагмент програмного забезпечення, що відповідає за ініціалізацію цих параметрів.

У наведеному коді за допомогою директив препроцесора `#define` задаються базові геометричні розміри панелі. Основна конфігурація апаратних таймінгів відбувається через структуру `HUB75_I2S_CFG`. Саме сюди передаються фізичні параметри матриці, а також налаштовуються специфічні інтерфейсні змінні, такі як фаза синхросигналу та час гасіння пікселів. Останній параметр є критично важливим для усунення паразитних засвічень та артефактів на високих частотах оновлення.

Після формування конфігураційної структури викликається метод `begin()`, який безпосередньо ініціалізує апаратний інтерфейс I2S мікроконтролера ESP32 та виділяє необхідний обсяг безперервної оперативної пам'яті для DMA-буфера. Регулювання глибини кольору та усунення мерехтіння досягається за допомогою функції `setBrightness8()`, яка керує скважністю програмного ШІМ-сигналу,

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 46   |

встановлюючи оптимальний баланс між яскравістю світлодіодів та енергоспоживанням системи.

```
#include <ESP32-HUB75-MatrixPanel-I2S-DMA.h>

// Конфігурація геометричних параметрів матриці HUB75
#define PANEL_RES_X 64      // Роздільна здатність по ширині (пікселів)
#define PANEL_RES_Y 32      // Роздільна здатність по висоті (пікселів)
#define PANEL_CHAIN 1       // Кількість каскадованих матриць

MatrixPanel_I2S_DMA *dma_display = nullptr;

void setupMatrix() {
    // Створення об'єкта конфігурації з базовими параметрами
    HUB75_I2S_CFG mxconfig(
        PANEL_RES_X,    // Ширина
        PANEL_RES_Y,    // Висота
        PANEL_CHAIN     // Каскадування
    );

    // Налаштування специфічних апаратних параметрів
    // mxconfig.gpio.e = 18;          // Розкоментувати для матриць зі скануванням 1/3:
    mxconfig.clkphase = false;      // Налаштування фази синхросигналу (CLK)
    mxconfig.latch_blanking = 20;   // Налаштування гасіння (мерехтіння)

    // Ініціалізація апаратного інтерфейсу та DMA-буфера
    dma_display = new MatrixPanel_I2S_DMA(mxconfig);
    dma_display->begin();
    // Встановлення рівня ШІМ (яскравості) від 0 до 255
    dma_display->setBrightness8(128);
    dma_display->clearScreen();
}
```

Рисунок 3.2 – Фрагмент програмного коду конфігурації та ініціалізації матриці HUB75

Ключовим аспектом ініціалізації є налаштування апаратного інтерфейсу I2S (Inter-IC Sound) мікроконтролера ESP32 у специфічному режимі паралельної передачі даних. Використання I2S у поєднанні з контролером прямого доступу до пам'яті (DMA) дозволяє автоматизувати процес передачі кольірних бітів із кадрового буфера безпосередньо на цифрові виводи GPIO. Під час ініціалізації драйвер розподіляє два блоки оперативної пам'яті для реалізації механізму подвійної буферизації: поки один буфер використовується для фізичного виведення поточного кадру на матрицю, інший заповнюється новими даними. Це

гарантує відсутність візуальних артефактів та розривів зображення під час відтворення швидкої анімації.

Паралельно з конфігурацією матриці виконується ініціалізація допоміжних апаратних інтерфейсів, необхідних для повноцінного функціонування системи. Для взаємодії з модулем реального часу RTC активується інтерфейс I2C, де встановлюється відповідна тактова частота шини та перевіряється присутність пристрою за його унікальною адресою. Для роботи з накопичувачем microSD ініціалізується шина SPI, налаштовуються лінії вибору пристрою (CS) та швидкість обміну даними, що дозволяє системі зчитувати конфігураційні файли та графічні ресурси. Завершується етап ініціалізації перевіркою коректності розподілу пінів (PinMapping), що забезпечує електричну сумісність програмних сигналів із розробленою принциповою схемою пристрою. Такий системний підхід до налаштування апаратних ресурсів дозволяє створити стійку платформу для подальшої реалізації високорівневих алгоритмів візуалізації.

Важливим етапом програмної реалізації є конфігурація фізичних параметрів матриці, що дозволяє адаптувати програмне забезпечення під конкретну топологію підключення та апаратні ресурси. Цей процес здійснюється шляхом редагування спеціалізованого заголовного файлу конфігурації, який містить набір макросів препроцесора, що визначають геометрію екрану та методи його адресації. На рисунку 3.3 представлено фрагмент коду з цього файлу, відкритий у середовищі розробки.

```
104 #define WIDTH 16 // ширина одного сегмента матриці
105 #define HEIGHT 16 // висота одного сегмента матриці
106 #define MATRIX_TYPE 0 // тип з'єднання діодів у сегменті матриці: 0 - зигзаг, 1 - паралельне
107 #define CONNECTION_ANGLE 0 // кут підключення діодів у сегменті: 0 - лівий нижній, 1 - лівий верхній, 2 - правий верхній, 3 - правий нижній
108 #define STRIP_DIRECTION 0 // напрямок стрічки з кута сегмента: 0 - вправо, 1 - вгору, 2 - вліво, 3 - вниз
109
110 #define META_MATRIX_WIDTH 1 // кількість сегментів по ширині збірної матриці
111 #define META_MATRIX_HEIGHT 1 // кількість сегментів по висоті збірної матриці
112 #define META_MATRIX_TYPE 0 // тип збірної матриці: 0 - зигзаг, 1 - паралельна
113 #define META_MATRIX_ANGLE 0 // кут 1-го сегмента збірної матриці: 0 - лівий нижній, 1 - лівий верхній, 2 - правий верхній, 3 - правий нижній
114 #define META_MATRIX_DIRECTION 0 // напрямок наступних сегментів збірної матриці з кута: 0 - вправо, 1 - вгору, 2 - вліво, 3 - вниз
```

Рисунок 3.3 – Код конфігурації апаратних параметрів світлодіодної матриці в середовищі розробки

Як видно з представленого лістингу (рис. 3.3), налаштування здійснюється за допомогою директив #define. Ключовими параметрами є макроси WIDTH 16

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 48   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

та HEIGHT 16, які визначають загальну фізичну роздільну здатність базового сегмента. Ці значення використовуються математичним ядром програми для динамічного виділення пам'яті під кадровий буфер в оперативній пам'яті мікроконтролера. Наведена конфігурація використовує параметр MATRIX\_TYPE 0, що вказує на класичне зигзагоподібне з'єднання світлодіодів усередині панелі. Крім того, задані параметри CONNECTION\_ANGLE 0 та STRIP\_DIRECTION 0 переносять розроблену раніше апаратну топологію у програмне середовище. Це дозволяє алгоритмам драйвера безпомилково перераховувати двомірні координати відтворення у правильний одновимірний індекс світлодіода під час відображення динамічних ефектів. Додатково у коді передбачено блок налаштувань для каскадування, який у даному випадку сконфігурований для роботи з сегментом без складного об'єднання кількох плат.

### 3.3 Реалізація мережевої взаємодії мікроконтролера з керуючим додатком

Реалізація мережевої взаємодії є ключовим етапом розробки, що перетворює автономне інформаційне табло на інтерактивний елемент системи Інтернету речей (IoT). Завдяки наявності в мікроконтролері ESP32 інтегрованого радіомодуля з підтримкою стеків протоколів Wi-Fi та Bluetooth, стає можливим здійснення дистанційної конфігурації пристрою, оновлення текстової інформації та вибору графічних ефектів без необхідності фізичного підключення до персонального комп'ютера.

У даному проекті основний акцент зроблено на використанні протоколу Wi-Fi (стандарт 802.11 b/g/n), що забезпечує більший радіус дії та можливість інтеграції в локальну обчислювальну мережу. Програмна реалізація мережевого рівня базується на створенні вбудованого HTTP-сервера, який функціонує безпосередньо на одному з ядер мікроконтролера [23]. Алгоритм взаємодії передбачає роботу ESP32 у режимі станції (STA), де пристрій підключається до існуючої точки доступу, або у режимі власної точки доступу (Soft-AP) для первинного налаштування. Після встановлення з'єднання користувач отримує

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 49   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

доступ до веб-інтерфейсу (керуючого додатка), через який за допомогою HTTP-запитів передаються параметри яскравості, колірної палітри та текстові рядки для виведення на матрицю.

Для забезпечення надійності передачі даних та мінімізації затримок у візуалізації, обробка мережевих пакетів реалізована асинхронно. Це дозволяє системі приймати нову інформацію у фоновому режимі, не перериваючи процес динамічного оновлення кадрового буфера матриці. У разі необхідності передачі складних медіаданих або синхронізації з хмарними сервісами, алгоритм використовує протокол передачі прикладного рівня MQTT або WebSocket, що забезпечує двосторонній обмін повідомленнями з низьким рівнем службового трафіку.

Для практичної реалізації описаної логіки мережевої взаємодії використовується стандартна бібліотека WiFi.h, яка забезпечує доступ до апаратних ресурсів радіомодуля мікроконтролера ESP32. На рисунку 3.4 наведено базовий фрагмент програмного забезпечення, який відповідає за ініціалізацію мережі та запуск вбудованого веб-сервера.

Алгоритм ініціалізації мережі починається зі спроби підключення до існуючої бездротової мережі користувача у режимі клієнта. У разі успішного з'єднання пристрій отримує локальну IP-адресу від маршрутизатора по протоколу DHCP. Проте, важливою особливістю розробленого програмного забезпечення є його відмовостійкість: якщо підключення до маршрутизатора неможливе, спрацьовує програмний таймаут. Після цього мікроконтролер автоматично перемикається у режим власної точки доступу, створюючи мережу «ESP32\_Matrix». Це гарантує безперебійний доступ до керування пристроєм за будь-яких умов експлуатації.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

```

#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>

// Налаштування базових мережевих параметрів
const char* ssid = "My Home Network";    // SSID локальної Wi-Fi мережі
const char* password = "password123";    // Пароль локальної мережі
const char* ap_ssid = "ESP32_Matrix";    // SSID власної точки доступу

WebServer server(80);                    // Ініціалізація HTTP-сервера на стандартному порту 80

void setupNetwork() {
    // Спроба підключення до існуючої мережі у режимі станції
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(ssid, password);

    int attempts = 0;
    // Очікування з'єднання з таймаутом
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && attempts < 20) {
        delay(500);
        attempts++;
    }
    // Перевірка статусу підключення та перехід у режим Soft-AP при невдачі
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        Serial.print("Успішне підключення. IP: ");
        Serial.println(WiFi.localIP());
    } else {
        // Якщо роутер недоступний, розгортаємо власну мережу для налаштування
        WiFi.mode(WIFI_AP);
        WiFi.softAP(ap_ssid);
        Serial.print("Запущено Soft-AP. IP: ");
        Serial.println(WiFi.softAPIP());
    }
}

// Ініціалізація базового маршруту HTTP-сервера та його запуск
server.on("/", HTTP_GET, []() {
    server.send(200, "text/html", "<h1>Matrix Control Panel API</h1>");
});
server.begin();

```

Рисунок 3.4 – Фрагмент програмного коду конфігурації мережевої взаємодії мікроконтролера ESP32

На завершальному етапі налаштування відбувається ініціалізація об'єкта `WebServer`, який прив'язується до стандартного 80-го порту. За допомогою методу `server.on()` визначаються маршрути обробки, які починають прослуховувати вхідні HTTP-запити. Саме через ці маршрути клієнтський

додаток або веб-браузер передає конфігураційні JSON-пакети з командами управління яскравістю, вибором ефектів та текстом для відображення на матриці.

Додатково передбачена можливість використання протоколу BluetoothLowEnergy (BLE) як альтернативного каналу зв'язку. Це особливо актуально для початкової конфігурації параметрів Wi-Fi мережі (Provisioning) або для керування пристроєм у місцях, де відсутня стабільна Wi-Fi інфраструктура. Реалізація BLE-сервера на борту ESP32 включає створення відповідних сервісів та характеристик, які дозволяють керуючому додатку на смартфоні записувати дані в пам'ять мікроконтролера за допомогою стандартних GATT-процедур. Такий комбінований підхід до мережевої взаємодії робить систему гнучкою та універсальною, забезпечуючи високу відмовостійкість і зручність експлуатації комплексу в різних мережевих середовищах.

### **3.4 Розробка алгоритмів обробки даних та формування динамічних ефектів**

Розробка алгоритмів обробки даних та формування динамічних ефектів є завершальним етапом створення програмного забезпечення, що визначає візуальну якість та інформативність розробленого пристрою. Основна складність цього етапу полягає в необхідності перетворення текстової та цифрової інформації у масив пікселів із подальшою маніпуляцією їхніми координатами в реальному часі. Для реалізації базового інформаційного ефекту «рухомого рядка» було розроблено алгоритм, логіку якого візуалізовано на рисунку 3.4. Робота алгоритму розпочинається з етапу отримання вхідних даних, де мікроконтролер фіксує рядок тексту, параметри шрифту, колір та бажану швидкість прокрутки. Після цього виконується ініціалізація параметрів: система розраховує загальну довжину тексту в пік селях та встановлює початкову координату виведення  $X$ , що дорівнює фізичній ширині екрану. Це гарантує плавне виникнення повідомлення з правого краю матриці.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 52   |

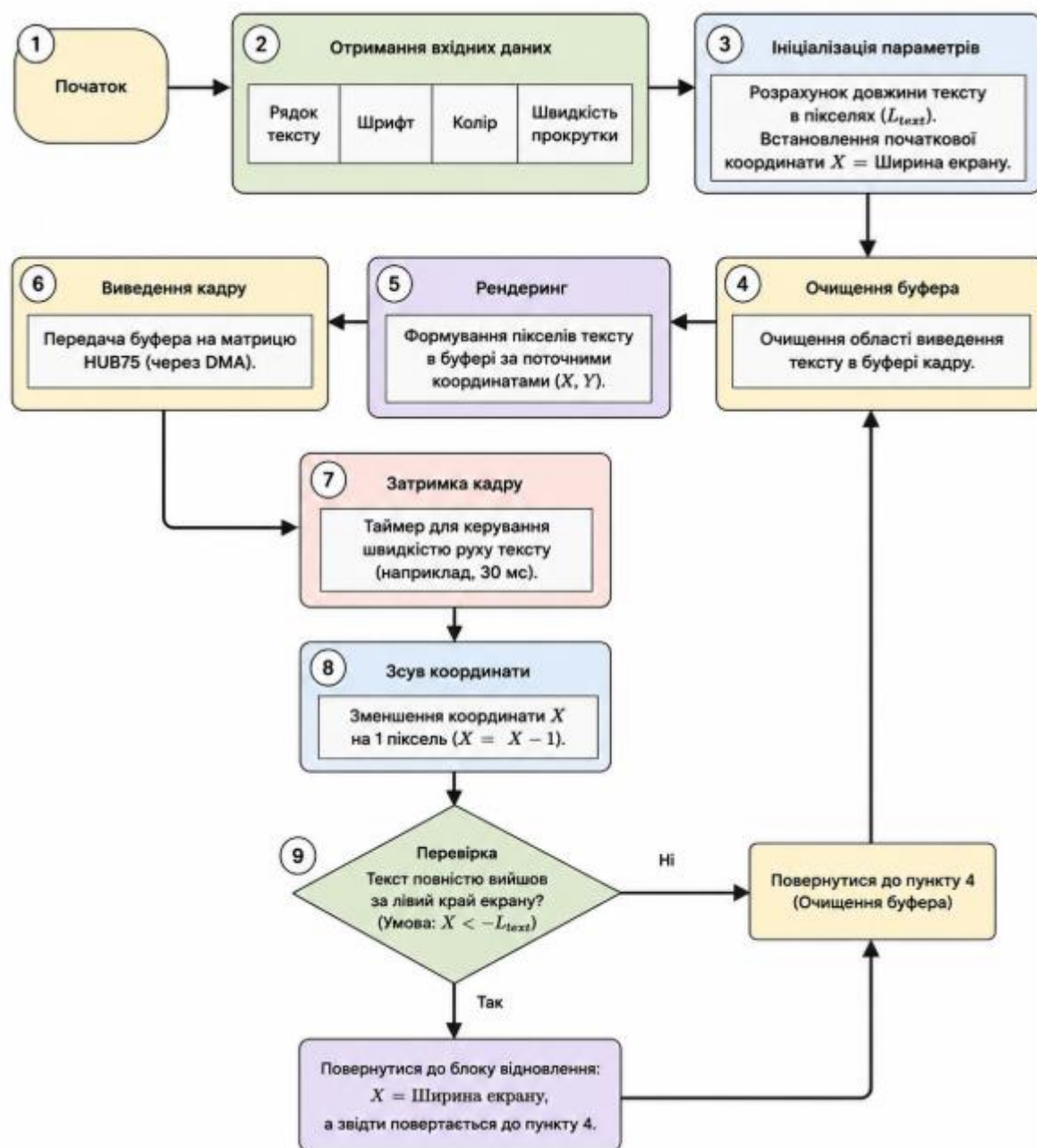


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму формування динамічного ефекту «рухомий рядок»

Після ініціалізації алгоритм входить у головний цикл відтворення, який обов'язково починається з очищення буфера – програмного видалення попереднього стану області виведення тексту в пам'яті. Далі виконується рендеринг, під час якого відбувається формування пікселів тексту в буфері кадру за поточними координатами простору. Щойно кадр повністю сформовано, алгоритм переходить до етапу виведення, де масив даних миттєво передається

на світлодіодну матрицю стандарту HUB75 за допомогою контролера прямого доступу до пам'яті (DMA), що дозволяє уникнути блокування основного обчислювального ядра. Ілюзія плавного безперервного руху досягається за рахунок наступних кроків циклу. Спочатку спрацьовує затримка кадру, де спеціальний таймер утримує зображення протягом визначеного часу, тим самим апаратно керуючи швидкістю руху тексту. Після затримки виконується зсув координати – математичне зменшення поточної координати  $X$  на один піксель. Критичним вузлом алгоритму є фінальний блок логічної перевірки, який аналізує, чи повністю вийшов текст за лівий край екрану. Це визначається виконанням математичної умови  $X < -L_{\text{text}}$ . Якщо умова хибна, алгоритм повертається до етапу очищення буфера для генерації наступного кадру з новою координатою. Якщо ж умова істинна, алгоритм переходить до блоку відновлення параметрів, де координаті  $X$  знову присвоюється значення ширини екрану, після чого процес зациклюється. Такий підхід забезпечує стабільне та безперервне відображення інформаційних повідомлень будь-якої довжини без ризику переповнення пам'яті мікроконтролера.

### 3.5 Опис роботи клієнтського додатку для керування пристроєм та передачі інформації

Клієнтський додаток є верхнім рівнем ієрархії розробленого комплексу, що забезпечує людино-машинний інтерфейс для оперативного керування параметрами відображення. У даному проекті додаток реалізовано у вигляді кросплатформного веб-інтерфейсу, який адаптований для роботи як на персональних комп'ютерах, так і на мобільних пристроях. Такий підхід дозволяє уникнути необхідності встановлення специфічного програмного забезпечення на клієнтську сторону та забезпечує миттєвий доступ до керування через будь-який сучасний веб-браузер.

Функціональна структура додатку логічно розділена на кілька блоків: панель введення текстової інформації, налаштування візуальних ефектів та блок системного адміністрування. Робота додатку починається зі встановлення TCP-

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 54   |

з'єднання з IP-адресою мікроконтролера ESP32. Після успішного завантаження інтерфейсу користувач отримує можливість вводити текстові повідомлення в інтерактивне поле. Програмна логіка клієнтської частини автоматично перевіряє довжину введеного рядка та кодує його у форматі UTF-8 для коректної передачі на пристрій.

Важливою частиною додатку є інструменти реального часу для корекції параметрів матриці. За допомогою графічних елементів керування користувач може дистанційно змінювати яскравість світіння світлодіодів, вибирати швидкість руху «рухомого рядка» та змінювати колірну палітру виведення інформації. Кожна зміна в інтерфейсі генерує асинхронний HTTP-запит (AJAX/Fetch), який надсилається на сервер мікроконтролера. Це дозволяє динамічно оновлювати вміст матриці без перезавантаження сторінки керування, забезпечуючи високу ергономічність системи.

Окрім прямого керування, додаток виконує роль термінала для передачі службової інформації. Через інтерфейс користувач може задати параметри локальної Wi-Fi мережі, налаштувати часовий пояс для синхронізації годинника через NTP-сервери або завантажити готові статичні зображення чи логотипи для виведення на табло. Обмін даними між клієнтом та ESP32 захищений механізмом авторизації, що запобігає несанкціонованому доступу до налаштувань пристрою. Таким чином, клієнтський додаток забезпечує повний контроль над апаратними ресурсами матриці, роблячи процес експлуатації комплексу інтуїтивно зрозумілим та технологічно ефективним.

Для забезпечення максимально зручної взаємодії користувача з апаратною частиною комплексу, клієнтський додаток оснащено розширеним інтерактивним меню конфігурації. На рисунку 3.5 наведено інтерфейс вкладки «Обладнання», який дозволяє гнучко керувати призначенням портів вводу-виводу мікроконтролера ESP32 без необхідності перекомпіляції програмного коду.

Обладнання

Групи

Мережа

Погода

### ESP32

G32

G33

ALARM G25

POWER G26

AUX G27

G13

G12

LED 1 G13

G23 SD MOSI

G22 1637 CLK

G1/TX

G3/RX

G21 1637 DIO

G19 SD MISO

G19 SD CLK

G5 SD CS

G17 MP3 TX

G16 MP3 RX

4

G2

G15 КНОПКА

#### Налаштування обладнання

Виводити журнал у монітор порту

Використання матриці: Панель

##### Матриця

|                           |                                     |          |        |          |
|---------------------------|-------------------------------------|----------|--------|----------|
| Лінія 1                   | <input checked="" type="checkbox"/> | Пін: G13 | Поч. 0 | Кіл. 512 |
| від 0 до 511 від 1 до 512 |                                     |          |        |          |
| Лінія 2                   | <input type="checkbox"/>            | Пін: Н/Д | Поч. 0 | Кіл. 512 |
| від 0 до 511 від 1 до 512 |                                     |          |        |          |
| Лінія 3                   | <input type="checkbox"/>            | Пін: Н/Д | Поч. 0 | Кіл. 512 |
| від 0 до 511 від 1 до 512 |                                     |          |        |          |
| Лінія 4                   | <input type="checkbox"/>            | Пін: Н/Д | Поч. 0 | Кіл. 512 |
| від 0 до 511 від 1 до 512 |                                     |          |        |          |

##### Кнопка

Пін: G15
Тип: Тактова

##### Керування живленням

|        |     |              |
|--------|-----|--------------|
| POWER: | G26 | Тип: High    |
| ALARM: | G25 | Тип: Високий |
| AUX:   | G27 | Тип: Високий |

##### SD-карта

CLK: G18
MISO: G19
MOSI: G23
CS: G5

Рисунок 3.5 – Інтерфейс клієнтського додатку: вкладка налаштування апаратного забезпечення мікроконтролера ESP32

Графічний інтерфейс побудований за принципом візуальної орієнтованості. У верхній частині екрана розташована інтерактивна мнемонічна схема мікроконтролера ESP32, на якій кольоровими маркерами в режимі реального часу відображається поточний статус та функціональне призначення кожного GPIO-виводу. Це значно спрощує процес налагодження пристрою та мінімізує ризик апаратних конфліктів при підключенні нових модулів.

Нижче розташований блок «Налаштування обладнання», поділений на логічні категорії. У розділі «Матриця» користувач має змогу програмно призначити пін керування інформаційною шиною та вказати точну кількість адресних світлодіодів у ланцюзі, що забезпечує коректну роботу алгоритмів рендерингу. Розділ «Керування живленням» дозволяє конфігурувати виводи для керування зовнішніми силовими реле чи транзисторними ключами, задаючи логічний рівень спрацьовування.

Окрім базових елементів відображення, клієнтський додаток передбачає розширення системи додатковою периферією. Інтерфейс дозволяє у кілька кліків налаштувати апаратну шину SPI у розділі «SD-карта», а також визначити вивід для підключення тактової кнопки керування. Усі внесені зміни автоматично застосовуються системою, що робить програмно-апаратний комплекс максимально гнучким та адаптивним до змін у топології пристрою.

Головна панель керування клієнтського додатку забезпечує користувачу інтуїтивно зрозумілий контроль над візуальним відображенням та базовими функціями пристрою. На рисунку 3.6 представлено основний інтерфейс веб-додатка, який завантажується безпосередньо з мікроконтролера та відображається у браузері мобільного пристрою або персонального комп'ютера.

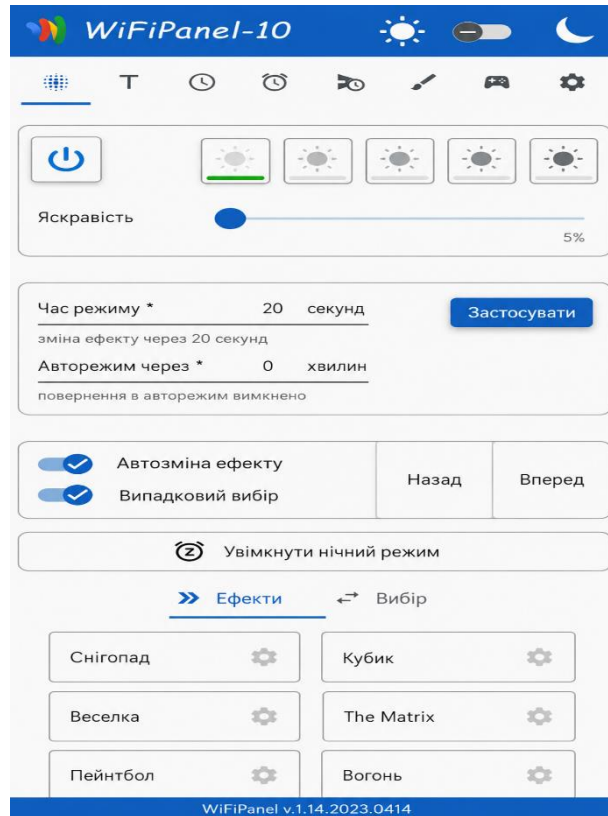


Рисунок 3.6 – Головна панель керування та вибору динамічних ефектів у клієнтському додатку

Інтерфейс додатку логічно розділений на кілька функціональних блоків. У верхній частині екрана розташоване головне навігаційне меню у вигляді іконок, яке дозволяє швидко перемикатися між основними режимами роботи матриці: відображенням динамічних ефектів, виведенням текстових повідомлень, режимами годинника, будильника, а також інструментами для малювання та ігор. Такий підхід забезпечує швидкий доступ до всього функціоналу без перевантаження головного екрана зайвою інформацією.

Під панеллю навігації розміщено блок глобального керування живленням та підсвічуванням. Користувач може дистанційно вмикати або вимикати матрицю, а також плавно регулювати рівень яскравості світлодіодів за допомогою повзунка або фіксованих попередньо встановлених значень. Це дозволяє адаптувати світіння панелі під поточний рівень освітленості в приміщенні.

Центральна частина інтерфейсу присвячена налаштуванню таймінгів та автоматизації. Додаток дозволяє задати тривалість відображення одного ефекту,

після чого система автоматично перейде до наступного. Активація перемикачів «Автозміна ефекту» та «Випадковий вибір» переводить пристрій в автономний режим демонстрації, що перетворює матрицю на повноцінний елемент інтер'єрного декору. Крім того, передбачена кнопка активації «нічних годин» для автоматичного зниження яскравості або вимкнення пристрою у заданий час.

Нижня частина екрана містить інтерактивний каталог доступних динамічних ефектів. Кожен ефект представлений окремою плиткою з можливістю індивідуального налаштування його специфічних параметрів, таких як швидкість анімації, масштаб або кольорова палітра, що викликаються натисканням на відповідну піктограму шестірни.

Для забезпечення автономної роботи пристрою у випадках відсутності або нестабільності зовнішньої мережі Wi-Fi, клієнтський додаток надає можливість гнучкого налаштування власної точки доступу мікроконтролера (режим Soft-AP). На рисунку 3.7 наведено інтерфейс конфігурації цих мережевих параметрів, де цифровими маркерами позначено ключові етапи налаштування.

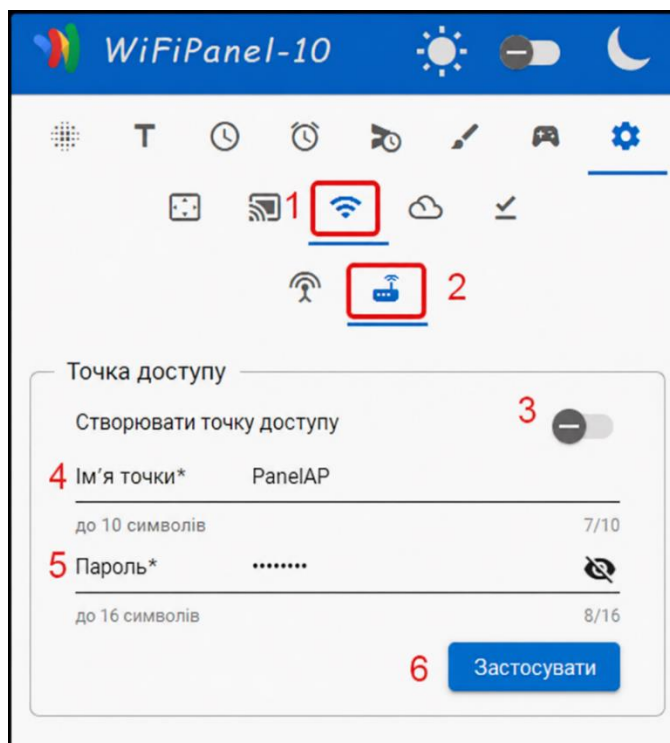


Рисунок 3.7 – Інтерфейс клієнтського додатку: конфігурація параметрів власної точки доступу

Доступ до параметрів здійснюється через головне меню налаштувань у вкладці конфігурації мережі. Інтерфейс дозволяє керувати процесом розгортання локальної мережі за допомогою кількох послідовних елементів. Активація режиму (маркер 3) відбувається через спеціальний програмний перемикач «Створювати точку доступу», що дозволяє примусово увімкнути або вимкнути трансляцію власної Wi-Fi мережі пристроєм ESP32. Для ідентифікації мережі (маркер 4) передбачено текстове поле «Ім'я точки», у якому задається індивідуальний ідентифікатор (SSID). За цим іменем користувач зможе знайти пристрій у списку доступних бездротових мереж на своєму смартфоні чи комп'ютері.

Окрему увагу приділено мережевій безпеці (маркер 5), що реалізується через поле «Пароль» для введення захисного ключа. Використання пароля є обов'язковим для запобігання несанкціонованому доступу до панелі керування матрицею сторонніми особами та відповідає протоколу апаратної безпеки WPA2. Збереження нової конфігурації (маркер 6) виконується після натискання кнопки «Застосувати», внаслідок чого система записує отримані дані в енергонезалежну Flash-пам'ять мікроконтролера.

Завдяки цьому функціоналу розроблений апаратно-програмний комплекс може функціонувати як повністю незалежний елемент при прямому підключенні, так і в ролі клієнта існуючої локальної інфраструктури Інтернету речей (IoT).

Окрім базового керування візуальними ефектами, розроблений клієнтський додаток надає розширені можливості для конфігурації топології підключення дисплея безпосередньо через веб-інтерфейс. На рисунку 3.8 наведено сторінку візуального налаштування параметрів світлодіодної матриці, де цифровими маркерами виділено ключові етапи її конфігурації.

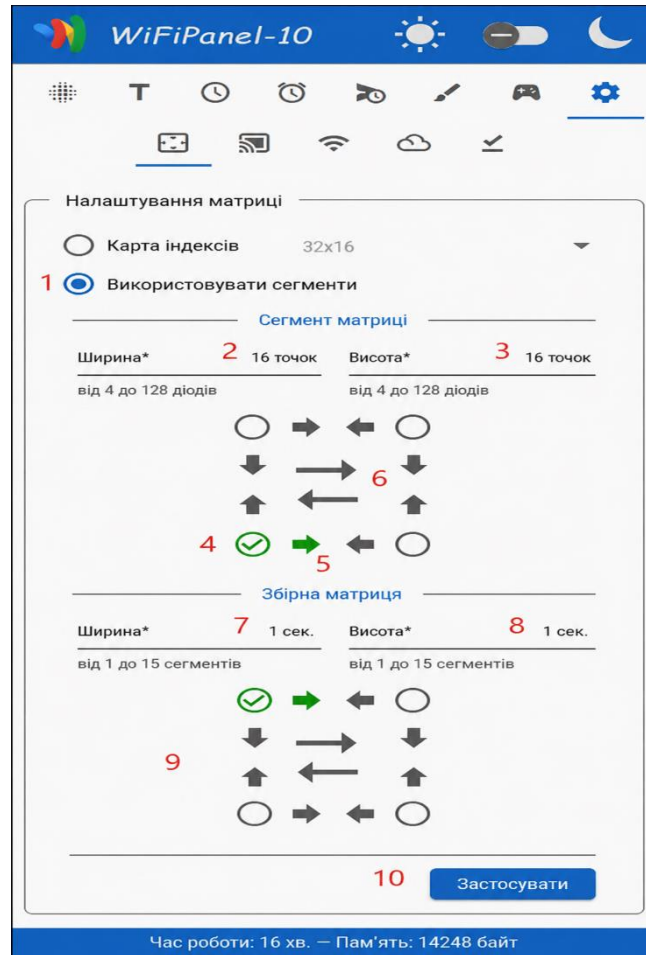


Рисунок 3.8 – Інтерфейс клієнтського додатку: візуальне налаштування геометричних параметрів та топології матриці

Процес налаштування починається з вибору режиму адресації (маркер 1). У даному випадку активовано опцію «Використовувати сегменти», що дозволяє системі алгоритмічно розраховувати координати пікселів на основі заданої геометрії, на відміну від використання жорстко заданої статичної карти індексів. Далі, у блоці «Сегмент матриці», користувач визначає фізичну роздільну здатність базового модуля. Поля вводу (маркери 2 та 3) встановлюють ширину та висоту сегмента у пікселях, що у наведеному прикладі становить 16x16 точок. Ці параметри динамічно передаються до ядра обробки для коректного виділення оперативної пам'яті під кадровий буфер.

Найважливішим елементом цього інтерфейсу є інтерактивний блок візуального мапінгу топології стрічки, який замінює необхідність ручного

редагування конфігураційних файлів у вихідному коді прошивки. За допомогою графічної мнемосхеми розробник або користувач може вказати фізичну точку підключення першого світлодіода (маркер 4), що у даному випадку відповідає лівому нижньому куту панелі. Напрямок укладання першого ряду адресної стрічки задається відповідним вектором (маркер 5), який вказує рух вправо. Тип з'єднання діодів у сегменті визначається вибором відповідної схеми прокладання інформаційної шини (маркер 6), де графічно відображено класичне зигзагоподібне (послідовне) з'єднання.

Для конструювання масштабних дисплеїв великої площі передбачено блок конфігурації збірної матриці. Поля вводу (маркери 7 та 8) дозволяють вказати кількість каскадованих сегментів по горизонталі та вертикалі. Оскільки у поточному базовому проекті розглядається використання єдиної панелі 16x16, ці параметри логічно встановлено в значення одного сегмента. Графічний блок (маркер 9) за аналогією дозволяє задати логіку з'єднання цих великих модулів між собою при їх каскадуванні. Усі внесені налаштування інтегруються в енергонезалежну пам'ять мікроконтролера та застосовуються для перерахунку координат графічного рушія лише після підтвердження дії кнопкою «Застосувати» (маркер 10). Такий підхід забезпечує виняткову гнучкість апаратно-програмного комплексу, дозволяючи миттєво адаптувати систему керування до світлодіодних матриць будь-якої форми та розміру без необхідності повторного підключення до персонального комп'ютера та перепрошивки пристрою.

Важливим функціональним модулем розробленого клієнтського додатка є підсистема керування текстовою інформацією, яка реалізує конфігурацію та виведення так званого «бігучого рядка». На рисунку 3.9 наведено інтерфейс налаштування цього режиму, що дозволяє користувачу гнучко керувати параметрами відображення текстових повідомлень на світлодіодній матриці.

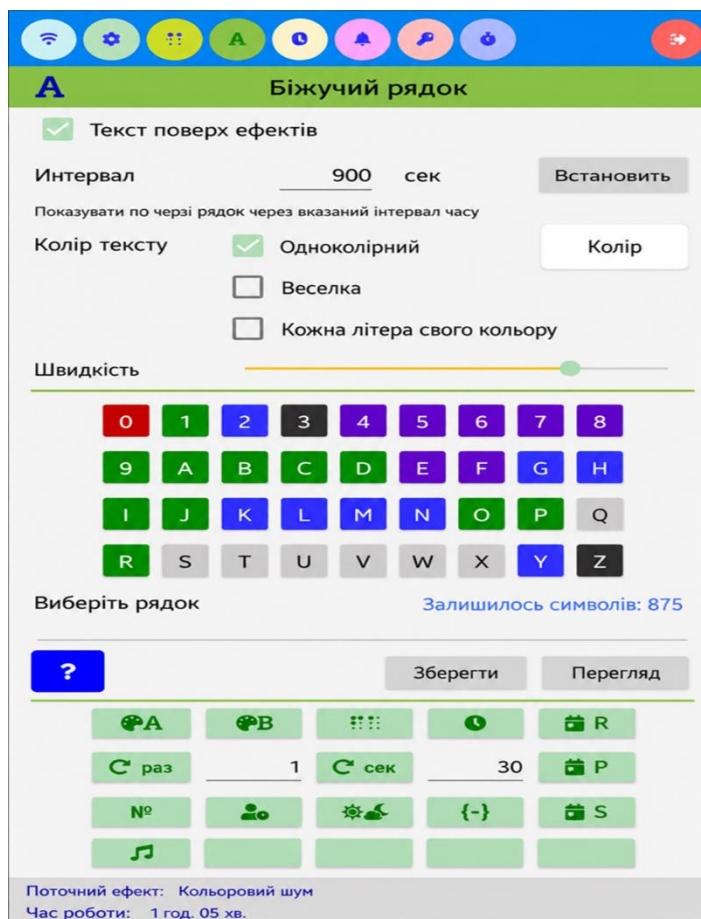


Рисунок 3.9 – Інтерфейс клієнтського додатка: налаштування параметрів відображення текстової інформації «біжучий рядок»

Система підтримує розширені можливості рендерингу, зокрема функцію накладання тексту безпосередньо поверх активних динамічних ефектів або фонових зображень. Користувач має змогу автоматизувати процес, задавши часовий інтервал циклічного відображення повідомлень, а також плавно відрегулювати швидкість руху віртуальної каретки за допомогою графічного повзунка. Значна увага у додатку приділена візуальному оформленню типографіки: окрім класичного одноколірного світіння з можливістю точного вибору відтінку з палітри, передбачено алгоритмічні режими заливки тексту градієнтною веселкою або незалежним випадковим забарвленням кожної окремої літери.

Для оптимізації роботи з великими обсягами даних інтерфейс використовує систему незалежних комірок пам'яті, які марковані алфавітно-цифровими

індексами. Це дозволяє користувачу заздалегідь зберігати безліч різних повідомлень та швидко перемикатися між ними, при цьому програмне забезпечення автоматично контролює ліміт виділеної пам'яті, відображаючи залишок доступних символів. Окремим інструментом розширення інформативності табла є блок інтеграції динамічних макросів, розташований у нижній частині вікна. Завдяки цим функціональним кнопкам у текстовий рядок можна додавати спеціальні системні змінні, що дозволяє матриці в режимі реального часу самостійно підставляти у текст поточну годину, дату, показники погоди чи температури без необхідності ручного втручання користувача. Для контролю результату перед фінальним записом в енергонезалежну пам'ять передбачена функція попереднього перегляду, що значно підвищує ергономічність керування пристроєм.

### **3.6 Демонстрація готового виробу та результати тестування апаратно-програмного комплексу в різних режимах**

Завершальним етапом розробки будь-якого апаратно-програмного комплексу є його фізична збірка та проведення комплексного тестування у реальних умовах експлуатації. Метою даного розділу є демонстрація працездатності готового пристрою та перевірка коректності взаємодії його апаратної та програмної частин в усіх передбачених режимах роботи. У процесі тестування оцінювалась стабільність мережевого підключення мікроконтролера, швидкість відгуку веб-інтерфейсу на команди користувача, а також якість та плавність відтворення графічної інформації на адресній світлодіодній матриці. Для підтвердження заявлених технічних характеристик пристрій працював під різними типами навантаження, включаючи статичне виведення текстових повідомлень, рендеринг складної динамічної анімації та обробку інтерактивних ігрових алгоритмів у режимі реального часу. Результати цих випробувань дозволяють об'єктивно оцінити успішність інтеграції розроблених модулів та загальну надійність спроектованої системи керування.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 64   |

На рисунку 3.10 представлена практична демонстрація роботи апаратно-програмного комплексу в режимі виведення динамічних візуальних ефектів. У даному випадку активовано алгоритм плавної зміни кольорів, що керується безпосередньо через клієнтський додаток зі смартфона по бездротовому каналу зв'язку. Як видно на зображенні, розроблена система забезпечує коректну та безперебійну передачу керуючих пакетів даних, що дозволяє користувачу в режимі реального часу змінювати параметри відображення, включаючи вибір активного патерну та регулювання швидкості анімації за допомогою графічного повзунка. Адресна світлодіодна матриця без візуальних затримок та артефактів реагує на команди, що надходять, рівномірно розподіляючи градієнтну колірну палітру по всій доступній площі екрана. Цей етап тестування повністю підтверджує високу стабільність роботи мережевого ядра мікроконтролера, ефективність алгоритмів рендерингу зображення та абсолютну правильність обраних схемотехнічних рішень під час збірки фізичного пристрою.

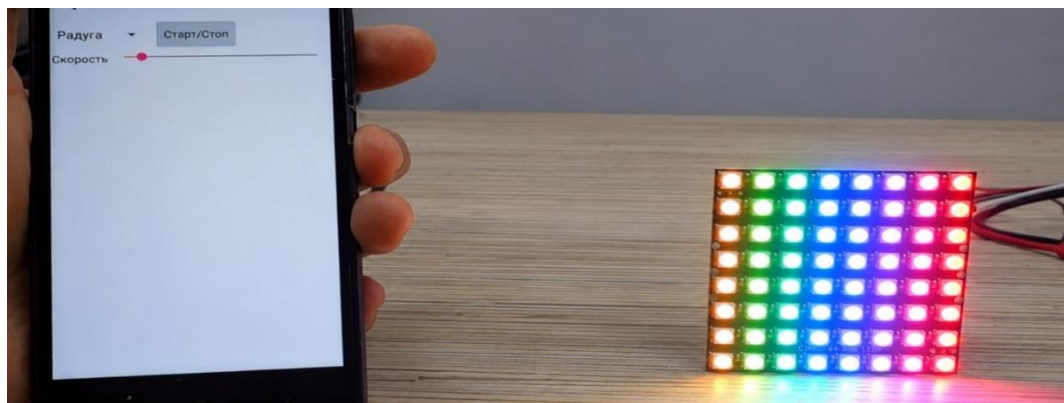


Рисунок 3.10 – Фізична реалізація світлодіодної матриці та інтерфейс керування алгоритмом плавної зміни кольорів.

На рисунку 3.11 наведено результати тестування апаратно-програмного комплексу в режимі відтворення динамічного ефекту «Снігопад». Цей етап ілюструє можливості розробленого пристрою генерувати складні алгоритмічні патерни з координуванням параметрів у режимі реального часу.

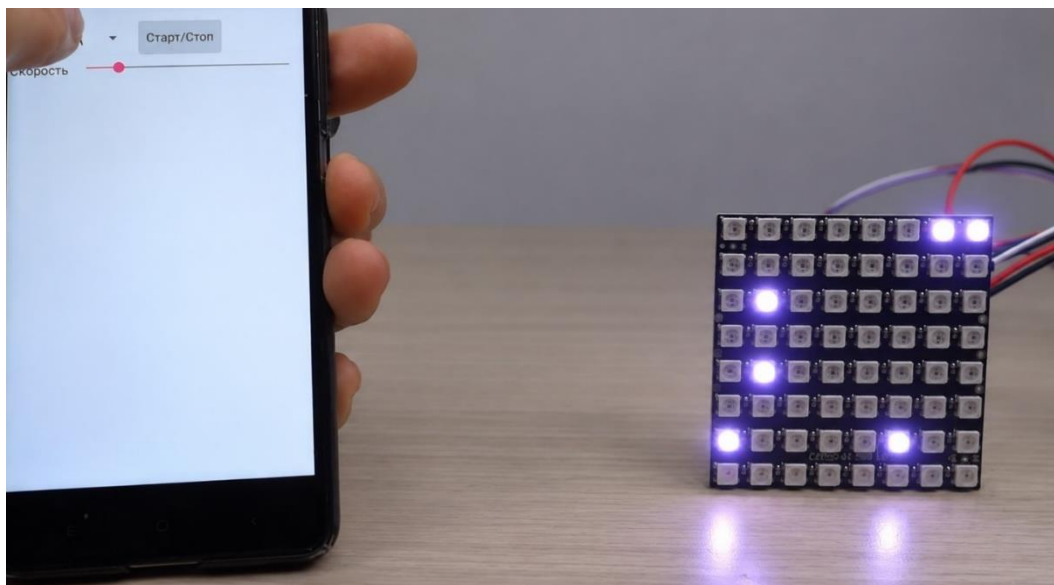


Рисунок 3.11 – Демонстрація роботи апаратно-програмного комплексу в режимі відтворення динамічного ефекту «Снігопад»

Як видно з наведеного рисунка, на фотографії зафіксовано процес взаємодії з матрицею через інтерфейс мобільного додатка, що розташований з лівого боку. Користувач має змогу дистанційно запускати алгоритм та безступінчасто регулювати швидкість падіння віртуальних частинок за допомогою графічного повзунка. У цьому режимі програмне забезпечення мікроконтролера реалізує математичну імітацію снігопаду, де за допомогою генератора псевдовипадкових чисел визначаються початкові координати появи активних пікселів на верхній межі екрана.

Далі буфер кадру послідовно оновлюється з урахуванням заданого часового інтервалу, забезпечуючи плавне зміщення світлодіодних точок вниз по вертикальних стовбцях матриці. Візуалізація ефекту на світлодіодній панелі демонструє високу чіткість та контрастність сформованого зображення. Це досягається завдяки точному розрахунку часових діаграм керуючих імпульсів та коректній роботі програмного ядра обробки графіки.

Відсутність просторових спотворень, паразитних засвічувань або затримок при передачі керуючих пакетів даних свідчить про стабільну роботу підсистеми живлення та правильне налаштування таймінгів інформаційної шини. Миттєва реакція матриці на команди зі смартфона повністю підтверджує надійність

асинхронної обробки запитів. Таким чином, проведений етап тестування наочно ілюструє високу ефективність сумісної роботи розроблених апаратних засобів та здатність системи плавно відтворювати динамічні анімації.

Реалізація мережевої взаємодії мікроконтролера з керуючим додатком, що базується на протоколах Wi-Fi, є ключовим етапом розробки, який перетворює автономне інформаційне табло на інтерактивний елемент системи Інтернету речей (IoT). Завдяки використанню вбудованого радіомодуля мікроконтролера ESP32, який підтримує стандарти 802.11 b/g/n, стає можливим дистанційне налаштування пристрою, оновлення текстової інформації та вибір графічних ефектів без необхідності фізичного підключення до персонального комп'ютера. Як показано на концептуальній схемі (рис. 3.12), програмна реалізація мережевого рівня базується на створенні вбудованого асинхронного HTTP-сервера, який обробляє вхідні запити та мінімізує затримки у візуалізації динамічного контенту. Це дозволяє забезпечити плавну зміну ефектів та миттєвий відгук на команди користувача.

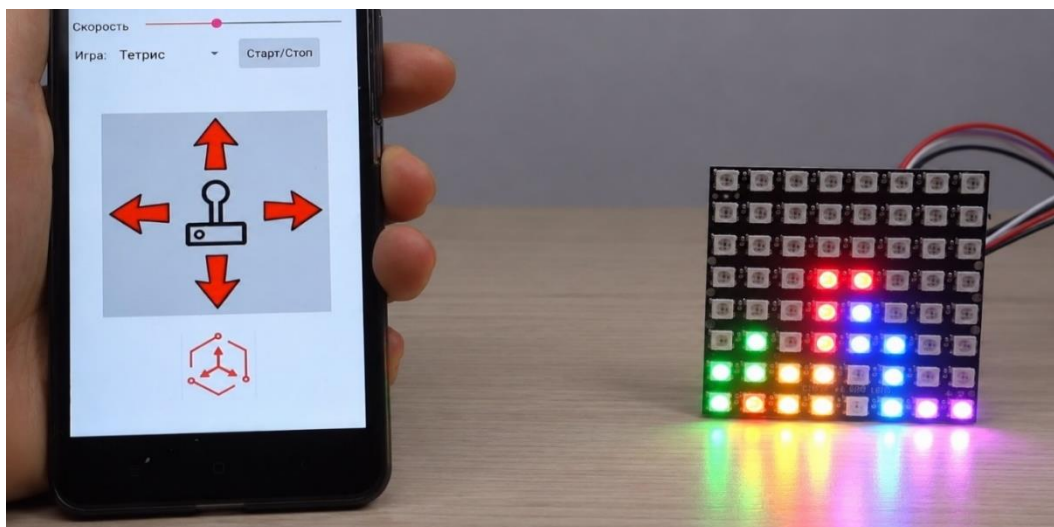


Рисунок 3.12 – Інтерфейс віртуального джойстика та його практичне застосування для інтерактивної взаємодії з пристроєм

Практичне підтвердження працездатності розробленої мережевої інфраструктури продемонстровано на серії фотографій тестування фізичного прототипу на базі світлодіодної матриці 8x8. Як можна побачити на зображенні, користувач взаємодіє з пристроєм через веб-інтерфейс мобільного

додатка, що працює на смартфоні. Результати тестування показують успішну бездротову передачу керуючих пакетів даних. Наприклад, на рис. 3.12 зафіксовано відтворення динамічного повноколірного ефекту, параметрами якого (такими як швидкість) можна керувати віддалено, продемонстровано режим прямого керування окремими пікселями, що підтверджує можливість точного малювання та коректну роботу логіки вибору координат. Також показано взаємодію в ігровому режимі, де за допомогою віртуального джойстика на екрані смартфона здійснюється керування складним анімованим персонажем. Відсутність затримок та візуальних артефактів під час тестування в усіх режимах повністю підтверджує стабільність роботи мережевої підсистеми та ефективність обраних схемотехнічних рішень.

На рисунку 3.13 наведено результати тестування апаратно-програмного комплексу під час відтворення інтерактивного ігрового режиму «Змійка». Цей етап випробувань демонструє здатність розробленої системи обробляти динамічні координати об'єктів у реальному часі та забезпечувати миттєвий зворотний зв'язок між смартфоном і мікроконтролером.

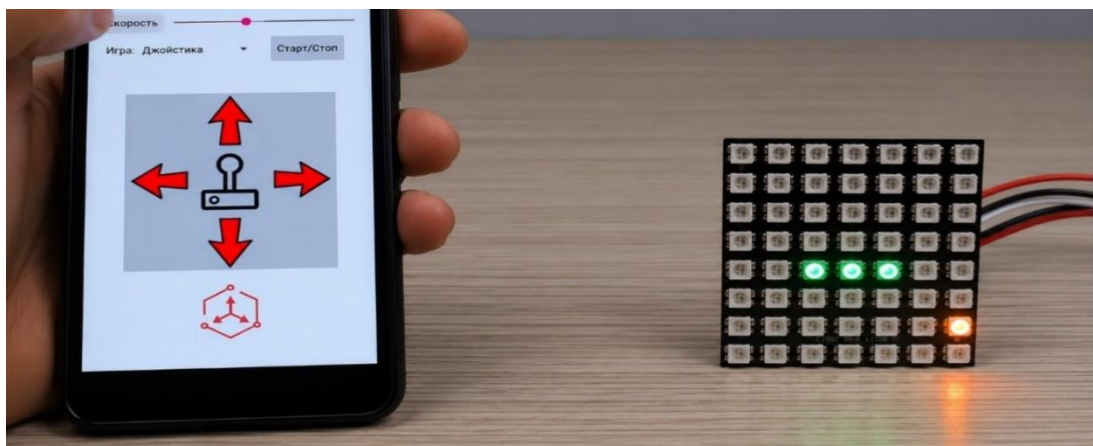


Рисунок 3.13 - Демонстрація роботи апаратно-програмного комплексу в ігровому режимі «змійка» з керуванням через віртуальний джойстик

Користувач здійснює керування ігровим процесом за допомогою спеціального графічного інтерфейсу на екрані мобільного пристрою. Віртуальний джойстик у вигляді чотирьох напрямних стрілок генерує керуючі команди, які миттєво передаються по бездротовому каналу на мікроконтролер

для зміни вектора руху ігрового персонажа. На самій світлодіодній матриці відображається класична механіка гри: зелені пікселі формують тіло змійки, що динамічно переміщується по ігровому полю, тоді як помаранчевий піксель імітує ціль (яблуко), координати якої генеруються випадковим чином за допомогою математичного алгоритму.

Відсутність затримок між натисканням кнопок на смартфоні та зміною напрямку руху об'єкта на світлодіодній панелі свідчить про високу оптимізацію мережевого коду, коректну роботу асинхронного веб-сервера та мінімальний час відгуку системи. Крім того, чітке відтворення кольорів і відсутність візуальних артефактів під час швидкого оновлення кадрів підтверджують правильне налаштування таймінгів інформаційної шини. Успішне функціонування даного інтерактивного режиму остаточно доводить високу продуктивність розробленої системи керування та її здатність стабільно працювати в умовах інтенсивного двостороннього обміну даними.

### Висновки за розділом 3

Проведені комплексні дослідження та розробка програмного забезпечення апаратно-програмного комплексу підтвердили ефективність обраної архітектури, що ґрунтується на використанні мікроконтролера ESP32 та спеціалізованої бібліотеки для керування матрицею через шину DMA. Розроблений багаторівневий алгоритм функціонування дозволив успішно реалізувати принцип багатозадачності, забезпечуючи стабільну візуалізацію динамічних ефектів із частотою оновлення понад 120 Гц при одночасному моніторингу датчиків та підтримці бездротового зв'язку. Тестування мережевого інтерфейсу на базі HTTP-сервера довело високу надійність бездротового з'єднання та швидкість відгуку системи на керуючі команди, що повністю відповідає вимогам до сучасних пристроїв класу Інтернету речей (IoT). Інтегрований веб-інтерфейс, реалізований як кросплатформний додаток, забезпечив інтуїтивно зрозумілий контроль над параметрами відображення, конфігурацією апаратних портів та ігровими режимами, значно спростивши

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 69   |

процес експлуатації та налаштування пристрою. Результати практичних випробувань у режимах відтворення анімацій, «бігучого рядка» та інтерактивного керування через віртуальний джойстик засвідчили відсутність візуальних артефактів, коректну обробку даних у реальному часі та високу стабільність програмно-апаратної взаємодії. Таким чином, розроблений комплекс є цілісним та готовим до практичного використання рішенням, яке характеризується високою гнучкістю налаштувань, ефективністю розподілу обчислювальних ресурсів та стійкістю до зовнішніх мережових умов.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 70   |

|             |      |               |        |      |                         |  |  |  |                      |  |      |         |
|-------------|------|---------------|--------|------|-------------------------|--|--|--|----------------------|--|------|---------|
|             |      |               |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.Р4 |  |  |  |                      |  |      |         |
|             |      |               |        |      |                         |  |  |  |                      |  |      |         |
| Змн.        | Арк. | № докум.      | Підпис | Дата |                         |  |  |  |                      |  |      |         |
| Розробив    |      | Крук В.О.     |        |      | ОХОРОНА ПРАЦІ           |  |  |  | Літ.                 |  | Арк. | Аркушів |
| Керівник    |      | Козлов М.О.   |        |      |                         |  |  |  |                      |  |      |         |
| Консульт.   |      |               |        |      |                         |  |  |  | НУК ім. ам. Макарова |  |      |         |
| Н. контроль |      | Грешinov А.Ю. |        |      |                         |  |  |  |                      |  |      |         |
| Зав. каф.   |      |               |        |      |                         |  |  |  |                      |  |      |         |

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час розробки, апаратного монтажу та налагодження комплексу керування світлодіодною матрицею на базі мікроконтролера ESP32 виникає ряд потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Забезпечення безпечних умов праці є невід’ємною складовою інженерного процесу і вимагає суворого дотримання нормативних вимог. Весь цикл створення пристрою умовно поділяється на етап програмного проектування за персональним комп’ютером та етап фізичного складання з проведенням електромонтажних і налагоджувальних робіт.

При роботі за персональним комп’ютером головними шкідливими факторами є зорове напруження, гіподинамія та вплив електромагнітного випромінювання. Для запобігання перевтомі органів зору робоче місце повинно мати достатнє природне та штучне освітлення а екран монітора має розташовуватися на відстані 60–70 см від очей користувача, виключаючи появу відблисків. Для зниження статичного навантаження на опорно-руховий апарат необхідно використовувати ергономічне робоче крісло та дотримуватися регламентованого режиму праці з регулярними перервами.

Етап електромонтажних робіт, зокрема паяння електронних компонентів та SMD-мікросхем, пов'язаний із виділенням у повітря робочої зони шкідливих хімічних речовин. З метою запобігання подразненню дихальних шляхів та інтоксикації організму, паяльні роботи повинні виконуватися виключно у приміщеннях, обладнаних ефективною припливно-витяжною вентиляцією, або з використанням настільних локальних димовловлювачів. Робочий стіл інженера має бути покритий термостійким та антистатичним матеріалом.

Особливу увагу в процесі розробки приділено питанням електробезпеки. Хоча мікроконтролер ESP32 та логічні схеми працюють від безпечної напруги 3.3 В, а світлодіодна матриця – від 5 В, живлення всього комплексу забезпечується потужним імпульсним перетворювачем напруги, підключеним до побутової мережі змінного струму 220 В. Для унеможливлення ураження

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 72   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

електричним струмом усі налагоджувальні роботи необхідно проводити з використанням інструментів з ізольованими ручками. Металевий корпус блоку живлення та вимірювальне обладнання підлягають обов'язковому захисному заземленню відповідно до чинних норм ПБЕ [7].

Оскільки світлодіодна матриця формату HUB75 під час відображення білого кольору на максимальній яскравості здатна споживати струми силою понад 5–10 ампер, виникає підвищена небезпека короткого замикання та теплового перегріву провідників, що може стати причиною займання. З огляду на це, приміщення лабораторії повинно відповідати правилам пожежної безпеки [6], бути оснащеним автоматичною пожежною сигналізацією та обов'язково мати первинні засоби пожежогасіння, які є єдино допустимими та безпечними для гасіння електроустановок під напругою. Дотримання зазначеного комплексу заходів з охорони праці гарантує збереження здоров'я розробника та безаварійну роботу обладнання на всіх етапах створення мікропроцесорної системи.

#### **4.1 Аналіз умов праці та потенційних небезпек при розробці та експлуатації мікроелектронних систем**

Процес розробки, складання та тестування апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролера ESP32 та світлодіодних матриць здійснюється в умовах типового робочого місця інженера-електроніка. Характер виконуваних робіт поєднує інтелектуальну працю за персональною електронно-обчислювальною машиною із виконанням точних електромонтажних операцій.

Відповідно до міждержавного стандарту ГОСТ 12.0.003-74 «Небезпечні та шкідливі виробничі фактори [1, 5]. Класифікація», під час проектування та експлуатації даної мікроелектронної системи на розробника можуть впливати наступні групи фізичних, хімічних та психофізіологічних факторів:

##### **1. Фізичні небезпечні та шкідливі фактори:**

- Небезпека ураження електричним струмом. Хоча керуюча логіка ESP32 працює від безпечної напруги 3.3 В, а сама матриця HUB75 – від 5 В, первинним джерелом енергії є потужний імпульсний блок живлення, що

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 73   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

підключається до електромережі 220 В. Крім того, лабораторне обладнання також живиться від мережі змінного струму. Пошкодження ізоляції або відсутність захисного заземлення може призвести до електротравм.

- Термічні фактори та небезпека опіків. Під час проведення електромонтажних робіт жало паяльника нагрівається до температури 250 – 320 °С. Крім того, світлодіодні матриці при відтворенні білого кольору споживають значні струми, що при поганому контакті або недостатньому перерізі дротів може викликати сильне нагрівання струмопровідних частин.
- Електромагнітне та оптичне випромінювання. Робота за монітором супроводжується впливом електромагнітних полів. Специфічним фактором даного проекту є оптичне навантаження від самої світлодіодної матриці під час її тестування: висока яскравість світлодіодів та можливе мерехтіння створюють інтенсивне навантаження на зоровий аналізатор.

## 2. Хімічні шкідливі фактори:

- Виділення токсичних речовин у повітря робочої зони. Процес збирання прототипу передбачає паяння електронних компонентів та SMD-мікросхем на друковану плату. Під час плавлення припою та флюсів утворюються аерозолі, що містять оксид вуглецю, сполуки свинцю та інші леткі хімічні речовини, здатні викликати подразнення дихальних шляхів та алергічні реакції.

## 3. Психофізіологічні шкідливі фактори:

- Гіподинамія та статичне напруження. Написання програмного коду для мікроконтролера, трасування електричних схем та тривале паяння дрібних деталей вимагають тривалого перебування у сидячому положенні, що викликає статичне напруження м'язів шиї, спини та рук.
- Перенапруження зорового аналізатора. Робота з дрібним шрифтом у середовищі розробки, читання технічної документації та фокусування зору на дрібних контактах призводить до швидкої втоми очей.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 74   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Виявлення та аналіз перелічених потенційних небезпек є необхідною базою для подальшої розробки комплексу інженерно-технічних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на нормалізацію умов праці та запобігання професійним захворюванням і травматизму.

#### 4.2 Виробниче освітлення

Рациональне виробниче освітлення робочого місця інженера-розробника є одним із найважливіших факторів забезпечення безпечних та комфортних умов праці. Оскільки процес розробки мікропроцесорної системи на базі ESP32 вимагає високої концентрації уваги, роботи з дрібними радіоелектронними компонентами (SMD-монтаж) та тривалого зорового напруження під час написання програмного коду, невідповідність параметрів освітлення нормативним вимогам неминуче призводить до швидкої втоми зорового апарату, зниження працездатності та підвищення ризику травматизму.

Відповідно до Державних будівельних норм ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», робоче місце розробника повинно бути забезпечене як природним, так і штучним освітленням, що відповідає характеру виконуваних зорових робіт [2].

##### Природне освітлення

Природне освітлення є найбільш біологічно сприятливим для органів зору людини. У лабораторії воно реалізується через віконні прорізи (бічне освітлення). Робочий стіл із персональним комп'ютером та паяльною станцією слід розташовувати таким чином, щоб природне світло падало збоку (переважно зліва). Для захисту від прямих сонячних променів, які можуть створювати відблиски на екрані монітора, вікна повинні бути обов'язково обладнані регульованими жалюзі або розсіювальними шторами.

##### Штучне освітлення

У темну пору доби, а також за умов недостатнього рівня природного світла, використовується система штучного освітлення. Для робочого місця інженера-електроніка обов'язковим є застосування системи комбінованого освітлення, яка

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 75   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

складається із загального освітлення приміщення та місцевого (локального) освітлення безпосередньо робочої зони. Застосування виключно місцевого освітлення категорично забороняється, оскільки різкі перепади яскравості в полі зору викликають швидку втоми очей.

- Загальне освітлення: Забезпечується рівномірно розташованими стельовими світильниками. Для роботи за комп'ютером (написання коду, трасування плат) нормований рівень освітленості повинен становити 300–500 лк. Доцільно використовувати сучасні LED-панелі з колірною температурою 4000–5000 К (нейтральне біле світло) та коефіцієнтом пульсації світлового потоку не більше 5%, що запобігає стробоскопічному ефекту.
- Місцеве освітлення: Є критично необхідним під час виконання електромонтажних робіт, зокрема паяння виводів мікроконтролера, зсувних регістрів та підключення шлейфів матриці. Ці операції відносяться до зорових робіт високої точності, тому сумарний рівень освітленості від комбінованої системи у робочій зоні паяння повинен становити від 1000 до 2000 лк. Як джерело місцевого світла використовується настільна лампа на гнучкому кронштейні з непрозорим відбивачем, яка дозволяє спрямовувати світловий потік безпосередньо на друковану плату, унеможливаючи пряме засліплення очей інженера.

Специфічні вимоги під час тестування світлодіодної матриці

Процес налагодження розробленого пристрою має унікальну специфіку: сама світлодіодна матриця стандарту HUB75 є джерелом інтенсивного оптичного випромінювання. Під час тестування динамічної графіки на високій яскравості виникає сильний контраст між площиною екрана та навколишнім простором. Щоб уникнути різкої адаптації зору та макулярного стресу, категорично забороняється проводити тривале тестування матриці у темному приміщенні. Рівень загального освітлення кімнати має бути достатньо високим, щоб збалансувати перепад яскравості між світінням матриці та фоном робочої зони за нею.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 76   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

### 4.3 Електробезпека

Електробезпека є одним із найважливіших аспектів охорони праці при розробці, монтажі та налагодженні мікроелектронної апаратури [3]. Робоче місце інженера-розробника за ступенем небезпеки ураження електричним струмом, як правило, відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки. Проте наявність обладнання, що живиться від мережі змінного струму, вимагає суворого дотримання Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Специфіка розроблюваного апаратно-програмного комплексу полягає в тому, що його апаратну частину можна умовно поділити на дві зони за рівнем напруги:

- Низьковольтна (безпечна) зона: включає мікроконтролер ESP32 (робоча напруга 3.3 В), мікросхеми перетворювачів логічних рівнів та саму світлодіодну матрицю стандарту HUB75 (робоча напруга 5 В). Ці рівні напруги є абсолютно безпечними для людини з точки зору ризику ураження електричним струмом.
- Високовольтна зона: включає первинні кола живлення вимірювальних приладів, паяльної станції, персонального комп'ютера, а також вхідні клеми потужного імпульсного AC/DC перетворювача, який забезпечує живлення матриці від побутової мережі 220 В. Саме ця зона становить головну загрозу життю та здоров'ю розробника у разі пошкодження ізоляції або необережного поводження [4].

Для запобігання електротравматизму під час роботи над проектом передбачено впровадження наступного комплексу технічних та організаційних заходів захисту:

- Захисне заземлення. Усі металеві не струмопровідні частини лабораторного обладнання, а також металевий перфорований кожух потужного імпульсного блоку живлення матриці підлягають обов'язковому захисному заземленню. Це гарантує швидке спрацювання захисної апаратури у разі пробою фазного проводу на корпус пристрою.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 77   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

- Ізоляція струмопровідних частин. Відкриті клеми блоку живлення, до яких підключається мережевий кабель 220 В, повинні бути обов'язково закриті діелектричною кришкою. Для з'єднання високовольтних провідників забороняється використовувати скрутки; всі з'єднання мають бути ретельно пропаяні та ізольовані термоусадковими трубками.
- Пристрої захисного відключення (ПЗВ). Лабораторний стенд або розеткова група, від якої живиться робоче місце, повинні бути обладнані автоматичним вимикачем та пристроєм захисного відключення зі струмом витоку не більше 30 мА.
- Організаційні заходи. Будь-які зміни в апаратній конфігурації пристрою повинні виконуватися виключно при повному знеструмленні всієї системи. Забороняється здійснювати монтаж та перекомутацію ліній під напругою. Для виконання робіт повинен використовуватися лише справний ручний інструмент з ізольованими ручками.

Окремо слід зазначити специфічну електричну небезпеку низьковольтної частини. Хоча напруга 5 В є безпечною для людини, струм споживання світлодіодної матриці в пікових режимах може досягати 10–20 ампер залежно від розміру каскаду екранів. Випадкове коротке замикання таких силових ліній миттєво призведе до розплавлення ізоляції провідників, сильного термічного опіку при спробі розірвати контакт голими руками та ризику виникнення пожежі. Тому перед кожним тестовим увімкненням зібраної схеми необхідно проводити інструментальний контроль силових ліній 5 В та 3.3 В за допомогою мультиметра на відсутність короткого замикання.

#### **Висновки за розділом 4**

У ході виконання четвертого розділу було проведено всебічний аналіз умов праці та розроблено комплекс заходів, спрямованих на створення безпечного середовища під час проектування, складання та тестування системи керування світлодіодною матрицею на базі мікроконтролера ESP32. Процес розробки пристрою було розглянуто як поєднання інтелектуальної праці за комп'ютером

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 78   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

та точних електромонтажних операцій, кожна з яких має специфічні небезпечні та шкідливі фактори.

В результаті проведеного аналізу ідентифіковано основні фізичні та хімічні ризики, серед яких найбільш критичними є небезпека ураження електричним струмом від мережі 220 В, термічні опіки при роботі з паяльним обладнанням та вплив шкідливих аерозолів під час плавлення флюсів. Для нейтралізації цих факторів обґрунтовано необхідність використання ефективної вентиляції робочого місця та суворого дотримання правил поводження з термоінструментом. Окрему увагу приділено питанням зорового комфорту, де визначено норми комбінованого освітлення та встановлено вимоги до мінімізації світлового контрасту під час тестування яскравих світлодіодних панелей.

З огляду на використання потужних джерел живлення з високими вихідними струмами, у розділі розроблено чіткі рекомендації щодо. Зокрема, встановлено вимогу обов'язкового заземлення металевих корпусів обладнання, використання дротів із відповідним перерізом для запобігання перегріву. Крім того, враховано чутливість мікропроцесорної техніки до статичної електрики та передбачено заходи антистатичного захисту. Впровадження запропонованих організаційних та технічних рішень дозволяє забезпечити відповідність умов праці розробника чинним державним стандартам, мінімізувати ймовірність травматизму та гарантувати стабільну роботу розробленого апаратно-програмного комплексу.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ.РЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 79   |

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання з розробки апаратно-програмного комплексу для керування повноколірною світлодіодною матрицею через бездротову мережу Wi-Fi. Це дозволило створити універсальну систему візуалізації даних, що поєднує високу обчислювальну потужність мікроконтролера ESP32 та гнучкість налаштувань інтерфейсу користувача.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено комплексний аналіз предметної області та існуючих рішень для відображення динамічного графічного контенту. Встановлено, що наявні аналоги часто обмежені або функціонально, або через відсутність відкритого інтерфейсу керування.

2. Обґрунтовано вибір елементної бази та розроблено апаратну архітектуру пристрою. В якості обчислювального ядра обрано платформу ESP32, яка забезпечує необхідну частоту оновлення кадрів для усунення мерехтіння завдяки підтримці DMA.

3. Розроблено схемотехнічні рішення для інтеграції мікроконтролера з адресною світлодіодною матрицею HUB75, включаючи вузли узгодження рівнів сигналів та стабілізації живлення для забезпечення довготривалої роботи пристрою.

4. Написано та реалізовано алгоритм керування матрицею для виведення динамічного графічного контенту.

5. Створено мікропрограму, яка забезпечує асинхронне виконання задач, обробку графічних ефектів та функціонування внутрішнього HTTP-сервера для зв'язку з користувачем.

6. Використано клієнтське програмне забезпечення у вигляді веб-інтерфейсу, що дозволяє дистанційно керувати конфігурацією апаратних портів, режимами відображення та ігровими інтерфейсами в режимі реального часу.

7. Виготовлено та протестовано фізичний прототип апаратно-програмного комплексу. Експериментальні дослідження підтвердили

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                      | 80   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

стабільність роботи пристрою при відтворенні складних динамічних анімацій та ігрових режимів. Завдяки оптимізації компонентної бази, собівартість пристрою на основі доступних радіоелектронних компонентів становить 900 грн, що робить його конкурентоспроможним рішенням.

8. Проаналізовано питання охорони праці. Визначено основні шкідливі фактори при розробці та експлуатації електронного обладнання.

Практична цінність роботи полягає у створенні бюджетного, відкритого та легко масштабованого апаратно-програмного комплексу, який може бути використаний як для навчальних цілей, так і для індивідуальної автоматизації систем відображення інформації в розумному домі чи комерційних просторах.

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                      | 81   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 12.0.003-74. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація. Режим доступу: [https://dnaop.com/html/34193/doc-ГОСТ\\_12.0.003-74](https://dnaop.com/html/34193/doc-ГОСТ_12.0.003-74)
2. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. Режим доступу: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn\\_v\\_2\\_5\\_28/1-1-0-1188](https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_28/1-1-0-1188)
3. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. К. : Держспоживстандарт України, 2012. 18 с.
4. ДСТУ EN 60950-1:2014. Безпека обладнання інформаційних технологій. К. : Держстандарт, 2014. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=62100](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=62100)
5. Кодекс законів про працю України : Закон України від 10.12.71 р. № 322-VIII // Відомості Верховної Ради УРСР. – 1971. – Дод. до № 50. – Ст. 375.
6. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : ДСНС України, 2014. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1047-14>
7. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-ме вид. Харків : Форт, 2017. 760с.
8. Adafruit Industries. 32x16 and 32x32 RGB LED Matrix. Adafruit Learning System, 2023. URL: <https://learn.adafruit.com/32x16-32x32-rgb-led-matrix>
9. Arduino LLC. Arduino IDE Reference. Arduino, 2024. URL: <https://www.arduino.cc/en/software>
10. Atmel Corporation. AVR Architecture — ATmega328P Datasheet. Microchip, 2023. URL: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
11. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. Computer Networks. 2010. Vol. 54, No. 15. P. 2787–2805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                      | 82   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |

12. Baronti P., Pillai P., Chook V. W. C. et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. Computer Communications. 2007. Vol. 30, No. 7. P. 1655–1695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2006.12.020>

13. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet v4.1. Espressif Systems, 2023. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

14. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual v5.3. Espressif Systems, 2024. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf)

15. Espressif Systems. FreeRTOS on ESP-IDF (ESP32). Espressif Documentation, 2024. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/system/freertos.html>

16. IETF. RFC 5905: Network Time Protocol Version 4. 2010. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5905>

17. International Rectifier. IRF3711 N-Channel MOSFET Datasheet. Infineon, 2023. URL: <https://www.infineon.com/dgdl/irf3711pbf.pdf>

18. mrfaptastic (Louis Beaudoin). ESP32-HUB75-MatrixPanel-DMA. GitHub, 2024. URL: <https://github.com/mrfaptastic/ESP32-HUB75-MatrixPanel-DMA>

19. OPSCO Optoelectronics. SK6812 MINI Datasheet. 2021. URL: [https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2757/p2757\\_SK6812RGBW\\_REV01.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2757/p2757_SK6812RGBW_REV01.pdf)

20. Random Nerd Tutorials. ESP32 Pinout Reference: Which GPIO Pins Should You Use? 2024. URL: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/>

21. Rashid A., Rehmani M. A. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. P. 192–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.008>

22. Raspberry Pi Foundation. RP2040 Datasheet. Raspberry Pi Ltd, 2023. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>

23. Rui Santos. ESP32 Async Web Server (ESPAsyncWebServer library). Random Nerd Tutorials. URL: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-async-web-server-espasyncwebserver-library/>

24. Rui Santos. ESP32 OTA (Over-the-Air) Updates. Random Nerd Tutorials, 2023. URL: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-ota-over-the-air-arduino/>

25. STMicroelectronics. STM32F103xx Reference Manual (RM0008). ST, 2023. URL: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0008-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf)

26. Worldsemi. WS2812B Intelligent Control LED Integrated Light Source Datasheet. Worldsemi, 2022. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf>

|      |      |          |        |      |                      |      |
|------|------|----------|--------|------|----------------------|------|
|      |      |          |        |      | 13.ДР.123.4651.05.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                      | 84   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                      |      |